

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechanické technologie

Změny mikrostruktury materiálu šroubu po tepelné expozici

Changes in Mechanical Properties and Microstructure
of Bolt Material after Thermal Exposure

Student:

Bc. Ondřej Cícha

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Krejčí Lucie, Ph.D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ondřej Cícha**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **2303T002 Strojírenská technologie**
Téma: **Změny mikrostruktury materiálu šroubu po tepelné expozici**
Changes in Mechanical Properties and Microstructure of Bolt Material
after Thermal Exposur
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii materiálů používaných v energetickém průmyslu.
2. Návrh zkoušení změny mechanických vlastností tepelně ovlivněných šroubů.
3. Zkoušení mechanických vlastností a metalografické hodnocení šroubů.
4. Vyhodnocení vlivu změny mechanických vlastností a mikrostruktury šroubů.
5. Diskuze dosažených výsledků a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

MOHYLA, P. Nové poznatky v oblasti výzkumu moderních žárovevých ocelí. In: *TechMat 05. Svitavy 4. listopadu 2005*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2005, s.17-21. ISBN 80-7194-803-9.
MOHYLA, P. KOUKAL, J. Vliv makrostruktury na mechanické vlastnosti svarových spojů oceli T24. In: *Nové materiály technologie a zařízení pro svařování. Ostrava 19.-21. září 2005*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, ČSÚ Ostrava, 2005, s. 175–180. ISBN 80-248-0898-6.
VODÁREK, V. Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12) % Cr ocelí. VŠB – TU Ostrava, 2003. 163s. ISBN 80-248-0329-1.
JONŠTA, Z. et al. *Žárupevné oceli a slitiny*. Žilina: ZUSI, 2002. 389 s. ISBN 80-968605-6-9.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

Ing. Lucie Krejčí, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019



.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Ondřej Cícha

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Nedašov 199, 76332

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CÍCHA, O. *Změny mikrostruktury materiálu šroubu po tepelné expozici: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2019, 60 s. Vedoucí práce: Krejčí, L.

Diplomová práce se zabývá změnou mikrostruktury a mechanických vlastností šroubů přírubového spoje. Konkrétně se jedná o změnu způsobenou tepelnou expozicí. V teoretické části je nejprve popsána obecná struktura kovových materiálů. Dále je zpracována studie materiálů používaných v energetickém průmyslu a v návaznosti na experimentální část jsou popsány šroubové spoje. Experimentální část se zabývá změnou materiálových vlastností šroubů. V rámci zkoušení mechanických vlastností byla provedena tahová zkouška a měření mikrotvrdosti. Při metalografickém hodnocení byla provedena kontrola makrostruktury a mikrostruktury. Závěrečná část práce hodnotí změny materiálových vlastností a popisuje možné příčiny znehodnocení šroubů.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CÍCHA, O. *Changes in Mechanical Properties and Microstructure of Bolt Material after Thermal Exposur: master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Technology, 2019, 60 p. Thesis head: Krejčí, L.

This master thesis, solve the change of microstructure and mechanical properties of bolts of flange joint. Specifically their change caused by heat exposur. First, the general structure of metallic materials is described in the theoretical part. Further there is a study of materials used in the energy industry. Screw connections are described in connection with the experimental part. The experimental part deals with the change of material properties of screws. Tensile testing and microhardness measurements were performed as a part of mechanical properties testing. During the metallographic analysis, the macrostructure and microstructure were checked. The final part of the work evaluates the changes in material properties and describes possible causes of stud bolts degradation.

OBSAH

Seznam použitých značek a symbolů.....	8
ÚVOD	10
1. MATERIÁLY PRO ENERGETICKÝ PRŮMYSL.....	11
1.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli.....	12
1.1.1 Martenzitické oceli	14
1.1.2 Feritické oceli	15
1.1.3 Austenitické oceli	16
2.1.4 Dvoufázové (duplexní) oceli	18
2.1.5 Precipitačně vytvrditelné oceli	19
1.2 Korozivzdorné slitiny na bázi niklu	20
1.3 Žáropevné oceli a slitiny	22
1.3.1 Feriticko-perlitické a bainitické	23
1.3.2 Vysokopopuštěné martenzitické	25
1.3.3 Austenitické oceli	26
2. ŠROUBOVÉ SPOJE.....	28
2.1 Závity	29
2.1.1 Výroba závitů	30
2.2 Montáž šroubových spojů	34
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	36
3.1 Zkoušení mechanických vlastností	40
3.2 Metalografické hodnocení.....	42
3.2.1 Šroub č. 1	42
3.2.2 Šroub č. 2	46
3.3 Hodnocení změny materiálových vlastností	49
ZÁVĚR.....	51
Seznam použité literatury.....	52

Poděkování.....	55
Seznam příloh	56

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
A	tažnost	[%]
Al	Hliník	[hm. %]
B	Bor	[hm. %]
C	Uhlík	[hm. %]
Cr	Chrom	[hm. %]
Cr ₂₃ C ₆	karbid chromu	[hm. %]
Cr ₂ O ₃	oxid chromitý	[hm. %]
Cu	Měď	[hm. %]
ČSN	Česká technická norma	[-]
EN	Evropská norma	[-]
Fe	Železo	[hm. %]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
Mn	Mangan	[hm. %]
Mo	Molyben	[hm. %]
M _s	martensit start	[°C]
N	Dusík	[hm. %]
Nb	Niob	[hm. %]
Ni	Nikl	[hm. %]
R _e	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{mT}	mez pevnosti při tečení	[MPa]
Si	Křemík	[hm. %]
T _g	mezní teplota	[°C]
Ti	Titan	[hm. %]
T _t	teplota tání	[°C]

V	Vanad	[hm. %]
W	Wolfram	[hm. %]
α	alfa	[-]
δ	delta	[-]

ÚVOD

Energetický a chemický průmysl tvoří důležité odvětví strojírenské výroby. Vysoké provozní parametry kladou vysoké požadavky na zařízení a materiály používané v těchto provozech. Zejména působení vysoké teploty, tlaku a působení agresivních prostředí vyžaduje používání materiálů, které jsou schopny odolávat těmto náročným podmínkám po celou dobu jejich předpokládané životnosti. Materiály, které umožňují provoz v kritických podmínkách, jsou rozděleny do několika základních skupin. Jedná se o materiály korozivzdorné a žáruvzdorné, které jsou schopny odolávat oxidaci materiálu za normální i zvýšené teploty. Další důležitou skupinou jsou žárovevné materiály, které jsou schopny si udržet potřebné mechanické vlastnosti i při vysokých teplotách. Zmiňované požadavky splňují také některé slitiny niklu, avšak z důvodu jejich vyšší ceny nejsou tak často využívány.

V návaznosti na materiály používané v energetickém průmyslu je v diplomové práci řešena změna vlastností materiálu šroubů vyrobených z Cr-Mo-V žárovevné oceli určené pro vyšší teploty. Šroubové spoje obecně, jsou jedním z nejpoužívanějších rozebíratelných spojení a spolu se spoji přírubovými, tvoří důležité konstrukční prvky nejen energetického průmyslu. Způsob výroby závitů a správná montáž šroubových a přírubových spojů se také z velké části podílí na správné funkci spoje. Šrouby pro experiment byly poskytnuty firmou Pokorný, spol. s r.o. v souvislosti s řešením netěsnosti přírubového spoje. Přírubový spoj byl součástí zařízení pro výrobu kyseliny dusičné. Z důvodu špatného odstínění přírubového spoje od vysoké teploty procesu, která je až 920 °C, došlo k nepravidelnému rozložení teplot, což mělo pravděpodobně za následek deformace, které způsobily netěsnost přírubového spoje.

Předmětem zkoumání diplomové práce jsou změny materiálových vlastností šroubů, způsobených vlivem tepelného zatížení. Budou zkoumány mechanické vlastnosti materiálu tepelně ovlivněných šroubů, které budou následně porovnány s mechanickými vlastnostmi polotovaru šroubů dle materiálového atestu. Dále bude posuzována také materiálová mikrostruktura a její možné přeměny. Cílem práce je určit změny způsobené tepelnou expozicí a odhadnout, jakým způsobem k těmto změnám mohlo dojít.

1. MATERIÁLY PRO ENERGETICKÝ PRŮMYSL

Energetický průmysl a s ním související energetické strojírenství je jedním z významných odvětví strojírenské výroby. Avšak v posledních letech prochází energetické strojírenství krizí. Jelikož je kladen stále větší důraz na ochranu životního prostředí, dochází k úpadku výstavby uhelných elektráren a je trendem směřovat k tzv. „zelené energetice“. Tento fakt ovšem nic nemění na tom, že v současné době představují tepelné elektrárny stále hlavní zdroj elektrické energie. [1] [2] [3]

Z toho důvodu je s ohledem na životní prostředí alespoň snahou zvyšovat účinnost tepelných elektráren. Se zvyšováním účinnosti souvisí zvyšování provozních parametrů a využívání materiálů, které odolávají těmto náročným provozním podmínkám. Zařízení využívané v tepelné energetice, především tlakové systémy parních kotlů, představuje specifickou oblast, která využívá tuto dlouhodobou odolnost použitých materiálů proti působení vysokých teplot a tlaků. Taktéž z důvodu velkých hmotnostních a finančních objemů jednotlivých komponent je snahou dosáhnout jejich nejlepšího ekonomického využití souvisejícího s dosažením jejich dlouhé životnosti. [1] [2] [3]

První skupinou materiálů, která je využívána pro tyto účely jsou tzv. žárovevné oceli. Tyto materiály jsou schopny dlouhodobě odolávat vysokým teplotám a napětím, při kterých si zároveň dokážou zachovávat potřebné mechanické vlastnosti. Další důležitou skupinou materiálů využívaných v energetickém průmyslu jsou oceli korozivzdorné a žáruvzdorné. Předností korozivzdorných a žáruvzdorných materiálů je schopnost vysoké odolnosti vůči chemické i elektrochemické korozi za normálních i za zvýšených teplot. [3] [4]

Žárovevné, žáruvzdorné a korozivzdorné materiály nachází široké využití nejen v energetickém průmyslu. Dalšími průmyslovými obory, které využívají tyto materiály, jsou například chemie a petrochemie, plynárenství, potravinářský průmysl, nebo také stavebnictví. [3] [4]

1.1 Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli

Obecně lze říct, že korozivzdorné a žáruvzdorné oceli mají zvýšenou odolnost proti korozi za normálních i zvýšených teplot. Ale je samozřejmé, že i tyto materiály korozi podléhají, avšak po mnohem delší době. Díky tomu dochází ke značnému prodloužení životnosti, což se odráží na jejich ceně. Při volbě korozivzdorné oceli je nutno přihlížet na více aspektů. Těmito aspekty jsou potřebné mechanické vlastnosti, druh provozního prostředí a také teplota a tlak provozního prostředí. [5] [4]

Podle mechanismu je možné korozi rozdělit na chemickou a elektrochemickou. Chemickou korozi je myšlena chemická reakce mezi nevodivým prostředím a povrchem součásti. Elektrochemická koroze probíhá, pokud je součást v elektricky vodivém prostředí (elektrolytu). [5] [4]

Korozivzdornost je definována jako odolnost vůči elektrochemické korozi za normálních teplot. Ke korozivzdorným řadíme oceli schopné pasivace. Pasivace je proces, při kterém se kovy a slitiny za určitých podmínek pokrývají ochrannou vrstvou, která korozi zpomaluje, takže se vůči korozi stávají pasivními. Základním prvkem se schopností pasivace je chrom, díky čemuž je základním prvkem korozivzdorných ocelí. Pasivace je podmíněna obsahem chromu v tuhém roztoku vyšším než 11,5%. Ke vzniku pasivační vrstvy přispívá nikl, který zároveň zvyšuje odolnost vůči redukčním kyselinám. Se zvyšujícím se obsahem chromu se korozivzdornost oceli zvyšuje a tím se rozšiřuje oblast jejího využití. Obsah chromu v tuhém roztoku závisí také na obsahu uhlíku. Uhlík způsobuje tvorbu karbidů, které snižují obsah chromu a dochází ke vzniku heterogenity materiálu (místa, která jsou ochuzena o chrom, mají nižší korozní odolnost). Karbidy chromu vznikající na hranicích zrn jsou obvykle příčinou mezikrystalické koroze. K mezikrystalické korozi dochází zejména v tepelně ovlivněné oblasti po svařování. Zamezení vzniku mezikrystalické koroze se provádí snížením obsahu uhlíku, nebo legováním prvky, které mají vyšší afinitu k uhlíku než chrom. [5] [4]

V případě, že je součást vystavena koroznímu prostředí při vysokých teplotách (asi nad 600 °C) pochody, které probíhají na povrchu součásti, jsou značně urychleny. Oceli, které se využívají pro práci v těchto podmínkách, se nazývají **žáruvzdorné**. Tyto oceli mají vysokou odolnost vůči oxidaci a korozi a mají dlouhodobě stálé vlastnosti při provozu v horkých plynech. Za žáruvzdornou považujeme ocel, která je vystavena teplotě T a hmotnost oxidů, které vzniknou za této teploty za dobu 120 hodin a po čtyřech meziochlazeních je menší než 1 g/m^2 a zároveň při teplotě $(T+50)$ menší než 2 g/m^2 .

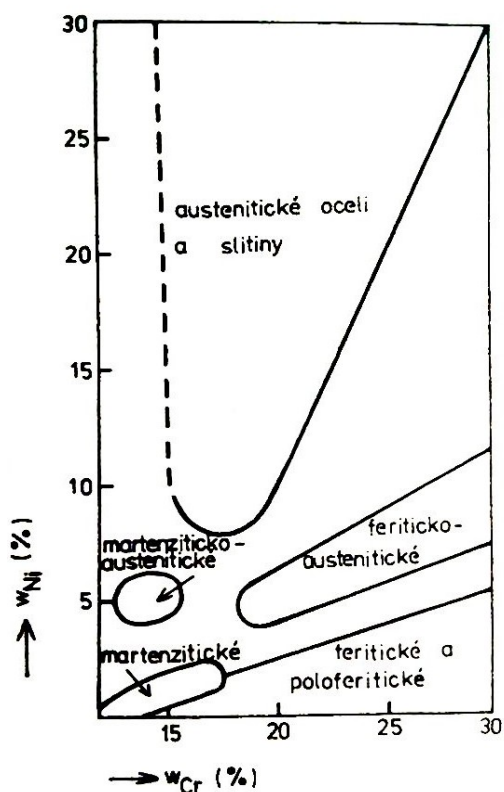
Žárovzdornost obecně závisí na chemickém složení materiálu a vnějších podmínkách. K vnějším podmínkám patří druh korozního prostředí, pracovní teplota (vyšší teplota urychluje průběh reakcí) a způsob ohřevu. Ocel získává odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách pomocí legování chromem, křemíkem, hliníkem a niklem. Pokud ocel obsahuje více než 13% Cr, dochází na jejím povrchu k tvorbě Cr_2O_3 , který obsahuje malé množství železa a niklu. Nikl přispívá ke zlepšení přilnavosti oxidické vrstvy a tím chrání povrch před další oxidací. Stejným způsobem jako chrom, vytváří ochranné oxidické vrstvy také křemík a hliník. [5] [4]

Chemické složení ocelí korozivzdorných je obdobné jako u ocelí žárovzdorných. Z toho vyplývá, že některé korozivzdorné oceli lze použít i jako oceli žárovzdorné. Kvůli podobnému složení se často tyto dva druhy ocelí v odborných publikacích popisují společně. Podle jejich chemického složení můžeme rozdělit korozivzdorné a žárovzdorné oceli na: [6] [7] [8]

- Chromové
- Chrom-nikové
- Chrom-manganové

Podle struktury je dále dělíme na:

- Martenzitické
- Feritické
- Austenitické
- Dvoufázové



Obrázek č. 1 Oblasti korozivzdorných ocelí v závislosti na obsahu Ni a Cr [8]

1.1.1 Martenzitické oceli

Martenzitické korozivzdorné oceli mají obsah chromu od 12 do 18% a obsahují 0,1 až 1,5% uhlíku. Chrom, stejně jako uhlík nebo mangan, snižuje kritickou ochlazovací rychlost a také teplotu M_s . Z toho důvodu se tyto oceli kalí v oleji nebo na vzduchu, což znamená, že jsou samokalitelné. Na rozdíl od vysokolegovaných samokalitelných nikových a manganových ocelí lze tyto oceli vyžít. Při dlouhodobém ohřevu na teploty blízko pod A_{c1} dochází k tvorbě feritické struktury se zrnitými karbidy, čímž dojde k odstranění vnitřního pnutí. Měkčího vyžítí dosáhneme, pokud zabráníme vytvoření martenzitu velmi pomalým ochlazováním, maximální rychlostí 0,5°C/min až do 650 °C. Tím dojde k přeměně austenitu na ferit s vyloučenými karbidy chromu a železa. [7] [8]

Martenzitické oceli mají za pokojové teploty základní martenzitickou fázi α a zhruba do 10% zbytkového austenitu nebo δ feritu. Pokud oceli obsahují větší množství Cr a Mo dochází ke zvýšení obsahu feritu a jedná se o ocel s částečnou fázovou přeměnou, která se někdy nazývá polo-feritická. Nad teplotou A_{c3} strukturu tvoří austenit a δ ferit. Následně při pokojové teplotě po zakalení je tvořena martenzitem a δ feritem, z čeho vyplývá název martenziticko-feritické oceli. [7] [8]

Další možností je obsah austenitu vyšší než 10%. Při zvýšení obsahu Ni na 4 až 6% je možné zvýšit korozivzdornost, plasticitu a také svařitelnost. Dochází ke vzniku ocelí martenziticko-austenitických, přičemž obsah austenitu není vyšší než 25%. [7] [8]

Martenzitické oceli se tepelně zpracovávají pomocí kalení a popouštění. Kalení se nejčastěji provádí při teplotách 1000-1050 °C. Při dostatečně dlouhém ohřevu na tyto teploty dojde k rozpouštění karbidů chromu a dojde ke vzniku dostatečně homogenní austenitické struktury. [7] [8]

Při popouštění začne tvrdost a pevnost klesat výrazněji až nad teplotou 500 °C. Popouštění martenzitických ocelí s obsahem 0,08 až 0,2% C a 13% chromu probíhá za vysokých teplot 670 až 720 °C. Nepopouštějí se v oblasti teplot 450 až 550°C, při kterých dochází ke vzniku popouštěcí křehkosti. Popouštění při teplotách nad 650 °C zaručuje optimální konstrukční vlastnosti, avšak způsobuje snížení korozivzdornosti.

Martenzitické chrom-nikové oceli obsahují zhruba 17% Cr, 2% Ni a do 0,2% C. Tyto oceli mají vyšší pevnost, podmíněnou svařitelnost a lepší plastické vlastnosti. [7] [8]

1.1.2 Feritické oceli

Jsou to oceli s obsahem uhlíku pod 0,1% a obsahem chromu do 30%. Feritické oceli mají dobrou odolnost proti korozi a také žáru, ale vykazují nízké hodnoty nárazové práce a mají špatnou svařitelnost a tepelnou zpracovatelnost. Jejich výhodou je úspora niklu a vysoká chemická odolnost při obsahu chromu 25 až 30%. Oceli s obsahem chromu více jak 21% jsou využívány jako žáruvzdorné. [5] [7] [8]

Jako korozivzdorné oceli se začínají využívat i tzv. superferity. Superferity jsou nízkointerstiální oceli, které se modifikují molybdenem až do 4%. Obsahují 25 až 29% chromu a jejich celkový obsah dusíku a uhlíku je max. 0,01%. Jejich přechodová teplota křehkého lomu je snížena až do -40 °C a mají zvýšenou odolnost proti mezikrystalové korozi, koroznímu praskání a mají dobrou svařitelnost. Při legování 2 až 4% niklu se zvyšuje jejich odolnost vůči roztokům kyseliny sírové, avšak snižuje se odolnost vůči koroznímu praskání v roztocích halogenidů. [5] [7] [8]

Tabulka č. 1. Feritické korozivzdorné a žáruvzdorné oceli [7]

	Označení ČSN EN	Číselné označení	A [%]	Rm [MPa]	Poznámka
Žáruvzdorné	X10CrAlSi18	1.4742	15	500-700	Přehřívače vzduchu, rekuperátory do 1000°C
	X10CrAlSi25	1.4762	10	500-720	Trubky v tepené technice do 1150°C
	X3CrAlTi18-2	1.4736	25	500-650	Stavba průmyslových pecí do 1000°C
	X18CrN28	1.4749	15	500-700	Součásti kotlů do 1100°C
Korozivzdorné	X2CrMoTi18- superferit	1.4521	20	400-600	Horkovodní instalace odolávající korozi za napětí
	X3CrTi17	1.4510	23	420-600	Armatury, pružiny, výměníky, jaderná energetika

Feritické oceli mají špatnou plasticitu, která se při zvyšující teplotě ještě zhoršuje. Při teplotách vyšších než 900 °C dochází k zhrubnutí jejich zrna a v rozmezí teplot 350 až 550 °C dochází k jejich křehnutí. Křehnutí nabývá maximální hodnoty při teplotě 475 °C. Feritickou strukturu mohou nabývat i oceli se 17% Cr, pokud obsah uhlíku

nepřevyšuje 0,08% a ocel obsahuje také titan nebo niob. Tyto přísady snižují hrubnutí zrna a jejich feritotvorný účinek zamezí vznik křehké martenziticko-feritické struktury. Zároveň dochází ke zlepšení svařitelnosti tohoto typu oceli. Mechanické vlastnosti feritických ocelí lze ovlivnit pouze plastickou deformací za studena a následným rekrytalizačním žiháním v rozmezí teplot 750 až 800 °C. Tepelné zpracování se u feritických ocelí neprovádí. Jedinou výjimku tvoří tepelné zpracování pro odstranění křehkosti při 475°C. Provádí se opakovaným ohřevem na teplotu 750-800 °C s 15 až 20 minutovou prodlevou a následným rychlým ochlazením. [5] [7] [8]

1.1.3 Austenitické oceli

Austenitické oceli jsou nejrozšířenějším druhem korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí. Legování slitiny železa s chromem pomocí vhodného množství niklu, manganu, popř. dusíku tvoří základ austenitických ocelí. Tyto oceli mají stabilní austenitickou strukturu za normálních i velmi nízkých teplot. Z důvodu absence fázových přeměn však dochází při vysokých teplotách k značnému růstu zrna, podobně jako u feritických ocelí. Avšak zhrubnutí zrna austenitické oceli nevede k jejímu zkřehnutí. Důležitou vlastností korozivzdorných austenitických ocelí je tažnost a houževnatost. [7] [8]

Základní množství legujících prvků austenitických ocelí je 18% chromu, 9% niklu s obsahem uhlíku přibližně 0,08%, případně 9-19% manganu s možnou kombinací přísady dusíku (do 0,5%), který nahrazuje nikl. Při legování manganem a dusíkem lze oceli používat v prostředí chloridů a sirných sloučenin. Z důvodu získání různých vlastností se množství základních a doprovodných prvků podle potřeby upravuje. Například titan a niob zvyšují odolnost proti mezikrystalové korozi, síra a fosfor zlepšují obrobitelnost, hliník a křemík zvyšují žáruvzdornost [7] [8]

Žáruvzdorné austenitické oceli mají vyšší odolnost proti oxidaci za vysokých teplot než oceli feritické, nebo feriticko-perlitické. Prvky, které zvyšují žáruvzdornost, až k teplotám 1000 °C jsou molybden, wolfram případně vanad. Tyto prvky zvyšují také žáropevnost, a proto oceli legované těmito prvky jsou zároveň žáropevné. [7]

Korozivzdorné austenitické oceli mají v porovnání s martenzitickými a feritickými celkově lepší korozivzdornost. Ta se zlepšuje zvyšováním obsahu Cr, Ni a přidáváním Mo, Cu a Si. V oxidačním prostředí zvyšuje korozivzdornost chrom, v redukčních kyselinách

nikl. Odolnost proti kyselině chlorovodíkové, chloridovým iontům a proti bodové štěrbinové korozi se zvyšuje legováním 2 až 4,5% molybdenem. [7]

Tabulka č. 2. Vybrané korozivzdorné a žáruvzdorné austenitické oceli [7]

	Označení ČSN EN	Číselné označení	A [%]	Rm [MPa]	Poznámka
Žáruvzdorné	X15CrNiSi20-12	1.4828	30	550-750	Keramické a sklenářské pece, neodolává sirným plynům
	X25CrMnNiN25-9-7	1.4872	25	850-1050	Součásti pecí středně mechanicky namáhané
	X10NiCr32-20	1.4851	30	490-740	Trubky pro ropný průmysl
Korozivzdorné	X10CrNi18-8	1.4310	40	500-750	Součásti v potravinářském průmyslu, na nízké teploty, hlubokotažné oceli
	X6CrNiTi18-10	1.4541	40	520-720	Součásti tepelných a energetických zařízení, tlak. nádoby v potrav. a chem do 800 °C, vysokotlaké zařízení
	X2CrNi19-11	1.4306	45	520-670	Chem. zařízení a tlak. nádoby do 350 °C, dobře lešitelná, hluboký tah

Austenitické oceli mají nízkou mez kluzu (190-250 MPa), která se rovná asi 40% meze pevnosti. Z důvodu jejich jednofázové struktury není možné upravovat jejich mechanické vlastnosti pomocí tepelného zpracování. Jejich vlastnosti lze měnit pouze deformací za studena, případně pomocí rekrystalizace za teplot 800 až 900 °C. Mechanické vlastnosti těchto ocelí jsou stabilní v širokém teplotním intervalu. Mají velmi dobrou otěruvzdornost a svařitelnost, z čehož vyplývá jejich široké využití včetně jaderné energetiky. [7]

Mnoho druhů korozivzdorných austenitických ocelí je možné podle obsahu základních legujících prvků rozdělit na oceli: [8]

- chrom-niklové (12-25% Cr, 8-38% Ni, 0,01-0,15% C)
- chrom-mangan-niklové (12-22% Cr, 5-12% Mn, 3-8% Ni, 0,02-0,15% C)
- chrom-manganové (10-18% Cr, 14-25% Mn, 0,02-0,08% C)

1.1.4 Dvoufázové (duplexní) oceli

U dvoufázových **austeniticko-feritických** ocelí dochází snížením obsahu niklu ke zvýšení podílu δ feritu na 30-50%. Obsažený ferit výrazně zvyšuje pevnostní vlastnosti, kdy mez kluzu stoupá až na 400-600 MPa a také zvyšuje odolnost proti koroznímu praskání pod napětím. Austeniticko-feritické oceli obvykle obsahují 19-30% chromu, 4-8% niklu, do 4% molybdenu, 0,1-0,3% dusíku při max. obsahu 0,03% uhlíku. Vlastnosti se upravují legováním pomocí Ti, Nb, Mn, N, Cu a W. Díky nižšímu podílu niklu dochází ke snížení ceny a z toho důvodu jsou austenitické oceli často austeniticko-feritickými nahrazovány. Tyto oceli mají dobrou odolnost vůči horkým trhlinám ve svarovém kovu, vykazují nižší zbytková pnutí a mají dobrou svařitelnost. Jejich nevýhodou je zkřehnutí při dlouhodobějším provozu za teplot 280-500 °C, ke kterému dochází jak v základním materiálu, tak ve svarovém kovu. [7]

Tabulka č. 3. Vybrané austeniticko-feritické a martenziticko-austenitické oceli [7]

	Označení ČSN EN	Číselné označení	A [%]	Rm [MPa]	Poznámka
Austeniticko-feritické	X2CrNiMoN22-5-3 SAF2205	1.4462	5	Min. 680	V chemickém a potravinářském průmyslu do 250 °C, dobrá svařitelnost
	X2CrNiMoN25-7-4 SAF 2507	1.4410	25	Min. 780	Vysoce kvalitní ocel odolávající chloridovým iontům, použití v mořské vodě
Martenziticko-austenitické	X3CrNiMo13-4	1.4313	11	900-1100	Cyklicky vysoce namáhané součásti, vodní turbíny, kompresory, dobrá svařitelnost
	X5CrNiCuNb16-4	1.4542	12	950-1150	Mechanicky značně namáhané součásti, odolná mořské vodě, v chemickém průmyslu, letectví

Oceli **martenziticko-austenitické** obsahují zhruba 10-25% austenitu a základní fází je martenzit. Mají vysokou pevnost, tažnost, dobrou odolnost vůči křehkému lomu, kavitaci a mají dobrou svařitelnost. Tyto oceli obsahují 13-17% Cr, 4-6% Ni, max. 2% Mo a obsah C je do 0,07%. Výhradně se používají v zušlechťelém stavu. Ke kalení, nebo normalizování se používá teplota 950-1050 °C, která se dostatečně k rozpouštění karbidů a vzniku austenitické struktury. Obvykle se podle popouštěcí teploty dosahuje

dvou pevnostních hladit. Při popouštěcích teplotách 500-530 °C bývá dosaženo meze pevnosti asi 1000 MPa. Při popouštění za teplot 600-630 °C pevnost klesá asi na 750-850 MPa. Využití těchto dvoufázových ocelí je například v klasické i jaderné energetice, nebo v chemickém průmyslu. [7]

1.1.5 Precipitačně vytvrditelné oceli

U předešle uváděných ocelí se zvýšení mechanických vlastností docílilo buď pomocí kalení (oceli martenzitické), legování dusíkem (oceli austenitické), tváření za normální teploty nebo doválcování za tepla (oceli feritické, austenitické). V případě složitých součástí představují tyto postupy zpevňování značné potíže. Obrábění kalených ocelí je z důvodu vysoké tvrdosti obtížné a provádět kalení až po obrobení, není z důvodu deformací možné. [8] [9]

Právě proto je velkou výhodou použití precipitačně vytvrditelných korozivzdorných ocelí, které lze obrábět v měkkém stavu a vytvrzovat už jako hotový výrobek. Vytvrzování se provádí popouštěním při poměrně nízkých teplotách, při kterých nedochází k deformaci a ani k značné oxidaci povrchu. Podle strukturních změn se vytvrditelné oceli rozdělují na oceli s přímou nebo nepřímou martenzitickou přeměnou, nebo oceli, které se vytvrzují přímo z austenitu bez přeměny. U všech typů precipitačně vytvrditelných ocelí jsou základními pochody: [8] [9]

- 1) rozpouštěcí žíhání při teplotě 1025 °C s rychlým ochlazením na teplotu martenzitické přeměny
- 2) vytvrzování za teploty 400-700 °C

Oceli s přímou martenzitickou přeměnou (např. ocel X12CrNiTi 17-7) se vytvrzují při teplotách 400-500 °C, kdy dochází k precipitaci intermetalických fází Ni_3Ti a Ni_3Cu a dosahují meze pevnosti 1300-1500 MPa. Využívají se v letectví, kosmonautice, nebo lodním průmyslu. K této skupině se řadí i vytvrditelné martenziticko-austenitické oceli, které mají ve vytvrzeném stavu vysokou mez kluzu (až 1600 MPa), dobrou plasticitu a odolnost proti korozi. Využívají se například pro lopatky parních turbín v jaderné energetice. Typickými zástupci vytvrditelných ocelí s nepřímou martenzitickou přeměnou jsou např. X8CrNiMoAl, nebo X10CrNiAl17-7. [9]

Austenitické precipitačně vytvrditelné oceli dosahují vysokých pevnostních hodnot pomocí precipitace karbidů a nitridů z austenitické struktury, nebo precipitací intermetalických fází Ti a Al, které precipitaci karbidů doprovází. Tyto oceli jsou využívány pro vysoce namáhané součásti (např. tryskové motory, turbínová kola), zařízení pro petrochemii a zařízení pro práci v nízkých teplotách. Korozní odolnost je obdobná jako u běžných korozivzdorných ocelí. [9]

1.2 Korozivzdorné slitiny na bázi niklu

Nové technologie využívané v chemickém a ropném průmyslu, energetice, požadavky na ochranu životního prostředí a vývoj výkonnějších leteckých a raketových motorů vyžadují vyvíjení kovových materiálů, které odolávají extrémním podmínkám. Zejména se jedná o korozi a mechanické namáhání za vysokých teplot. Tyto požadavky obstojně splňují slitiny niklu. K vývoji těchto slitin výrazně přispěl letecký a raketový průmysl, pro které byly výdaje na vývoj a výrobu druhořadou otázkou. Niklové korozivzdorné slitiny tvoří převážně austenitická struktura. Navazují na austenitické chromniklové oceli, které mají 8-29% niklu. V niklových slitinách stoupá obsah niklu až k 80%. [7] [8]

V současně používaných spalovacích turbínách bývají součásti z niklových slitin vystavovány teplotám, které dosahují až 80% jejich teploty tavení. Kvalitní niklové slitiny lze dlouhodobě vystavit za současného působení mechanických napětí teplotám max. 950 °C (žáropevné slitiny). Bez působení mechanického napětí můžou dlouhodobě odolávat teplotám 1150 °C (žáruvzdorné slitiny). Jejich spodní hranice použitelnosti je z hlediska ekonomiky provozu asi 550°C, kdy pod touto teplotou lze úspěšně aplikovat levnější konstrukční materiály, kterými jsou obvykle oceli. [7] [8]

V České republice se do 90. let běžně využívali žáruvzdorné a žáropevné niklové slitiny z bývalého sovětského svazu. Jejich značení je podle ruských norem GOST, což znamená značení počátečními písmeny EI. Jedná se například o slitinu EI 435. V současné době však patří k nejrozšířenějším slitiny výrobců z USA nebo Velké Británie. Obdobami zahraničních slitin jsou české slitiny od podniků Poldi Kladno (slitina Poldi AKNC), nebo Škoda Plzeň (slitina Škoda VZÚ 60). Ke značení niklových slitin se často používá systém označování podle jejich největšího světového producenta, kterým je americký Special Metals Group. Toto označování rozděluje niklové slitiny do 4 skupin, kterými jsou technické nikly, Monely, Incoloye a Inconely. [7]

Technický nikl, až do jeho teploty tání 1454b°C, vykazuje krychlovou plošně centrovanou mřížku a jeho hustota je 8,89 g/cm³. Je dobře odolný vůči suchým halogenidům, halogenvodíkům a organickým kyselinám. Nejvyšší typ NICKEL 270 obsahuje 99,9% niklu a max. 0,02% uhlíku. Jeho nevýhodou je nízká mez kluzu (100-140 MPa) ve vyžíhaném stavu. Má nízkou tvrdost a proto není vhodný pro využití v abrazivním prostředí. Vytvrzení niklu je možné legováním 4,5% Al a 0,5% Ti. [7]

Monel je název pro slitinu niklu a mědi. Tyto slitiny mají vysokou plasticitu a vysokou odolnost proti korozi, jsou však málo pevné. Při komplexním legování křemíkem, manganem a železem mohou dosahovat dle složení a tepelného zpracování pevnosti až 500 až 1200 MPa. Monely legované hliníkem jsou precipitačně vytvrditelné a mohou dosahovat pevnosti až 1400 MPa. Využívají se např. v potravinářském a chemické průmyslu, nebo na součásti čerpadel a lopatky turbín. [5] [7]

Slitina niklu, chromu a železa se nazývá **Inconel**. Pro precipitační vytvrzování se využívá dolegování Ti, Al, Nb a Mo. Jsou to slitiny, které obsahují vysoký podíl niklu (50-70%). Mají vysokou odolnost proti koroznímu praskání, louhům a mají velmi dobrou žáruvzdornost. Vytvrditelný INCONEL 751 má dobrou otěruvzdornost, tvrdost a odolnost proti spalínám. Díky těmto vlastnostem se využívá pro výrobu ventilů spalovacích motorů. [7]

Incoloye jsou také slitiny niklu, chromu a železa, avšak obsah niklu je u nich jen kolem 30%. Tato skupina také obsahuje precipitačně vytvrditelné slitiny. Tyto slitiny vykazují nejvyšší odolnost proti korozi a používají se například pro armatury, které pracují s kyselinou sírovou vysoké koncentrace, nebo s horkou kyselinou fosforečnou. [7]

Tabulka č. 4. Slitiny na bázi niklu [10]

Druh slitiny	Obchodní název	Chemické složení [hm. %]						Pevnost v žíhaném stavu [MPa]
		Ni	Cu	Cr	Fe	Mo	Co	
Ni 99,5		99,5	0,2	-	0,05	-	-	340-550
NiCu30	Monel	66,5	31,5	-	1,2	-	-	420-580
NiCr20	Nimonic	76	-	19,5	-	-	-	min. 650
NiCr16Fe8	Inconel	76	-	15,5	8	-	-	550-690
NiCr15Fe24	Nichrome	57	-	16	25	-	-	min. 640
NiCr22Fe17	Hastelloy17	47	-	22	-	6,5	6,5	min. 710

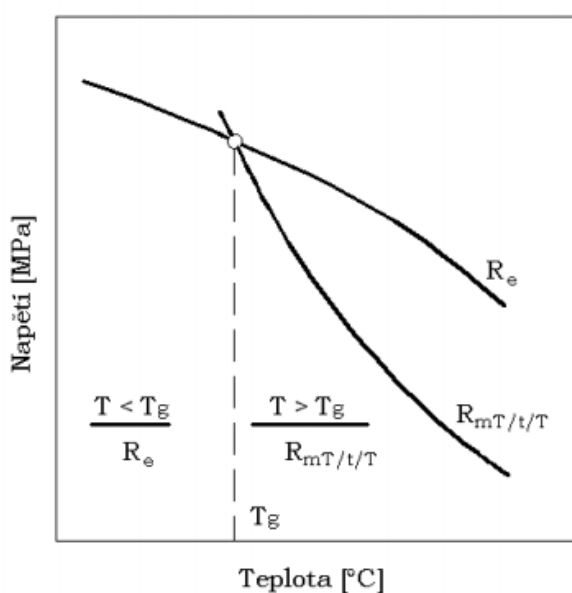
1.3 Žáropevné oceli a slitiny

Žáropevné oceli a slitiny jsou významnou skupinou materiálů využívaných v energetickém průmyslu, které jsou díky svým vlastnostem schopny pracovat až do teplot $0,75T_t$. Žáropevnost je definována jako odolnost proti creepu za vysokých teplot. Creep, v českém překladu tečení, je plastická deformace uskutečňující se za konstantní teploty a při konstantním napětí (nebo konstantním zatížení) v závislosti na čase. [11] [12]

Vlivy, které mají obecně největší význam na působení creepu jsou

- úroveň zatížení
- teplota
- chemické složení materiálu
- struktura materiálu

Pro rozlišení oblastí, ve kterých creep na materiál působí je zásadní teplota. Za žáropevné, tedy odolávající creepu, jsou považovány všechny oceli a slitiny, které jsou používány za teplot vyšších, než je mezní teplota T_g . Mezní teplota T_g je dána průsečíkem dvou charakteristik pevnostních vlastností za zvýšené teploty. Těmito charakteristikami jsou minimální hodnota meze kluzu R_e ($R_{p0,2}$) stanovená tahovou zkouškou a mez pevnosti při tečení R_{mT} . Mez pevnosti při tečení udává napětí, které vyvolá při dané teplotě a po uplynutí předepsaného času lom. Nad mezní teplotou jsou hodnoty meze pevnosti při tečení vždy nižší, než je mez kluzu materiálu (obr. č. 2.). [11] [12] [13]



Obrázek č. 2. Stanovení mezní teploty T_g [11]

V současné době nachází žárovevné oceli nejširší využití v energetice a to například při konstrukci kotlů, rozvodů páry, turbín, armatur, atd. Hojně uplatnění nachází také v chemickém průmyslu při výrobě dehtu, syntéze čpavku nebo výrobě syntetických pohonných látek. Obecně všude tam, kde se pracuje při vysokém tlaku a teplotách až 600 °C. Při vyšších teplotách (zhruba nad 550 °C), kdy dochází ke značné oxidaci železa je třeba kromě žárovevnosti zajistit také žáruvzdornost, o které pojednávala předchozí kapitola. [4] [7]

U chemického složení žárovevných ocelí je třeba brát v úvahu přítomnost stopových prvků. Stopové prvky snižují jejich mechanické vlastnosti a zvyšují rozptyl mechanických vlastností. Mezi škodlivé stopové prvky, které zhoršují vlastnosti žárovevných ocelí, patří např. olovo, cín, arzén, síra, fosfor, dusík, kyslík a vodík. [4] [7]

Podle fázového složení lze žárovevné oceli rozdělit na skupiny feriticko-perlitických a bainitických ocelí, které se podle chemického složení (úrovně legování) dělí na nelegované a nízkolegované. Mezi skupinu vysokolegovaných patří oceli vysokopopuštěné martenzitické a oceli austenitické. [4] [7]

1.3.1 Feriticko-perlitické a bainitické

Uhlíkové feriticko-perlitické oceli a nízkolegované feriticko-bainitické s přídavkem Cr, Mo, Ni, Ti a B jsou používány zejména v normalizovaném stavu v rozsahu teplot asi do 400 °C, tedy pod jejich mezní teplotou. [7] [12]

Jakostní nelegované tvářené oceli pro tlakové nádoby a zařízení, které pracují za vyšších teplot, mají strukturu feriticko-perlitickou. Tyto oceli jsou typické následující úpravou chemického složení. Snížení obsahu uhlíku na max. do 0,22%. Celkový obsah prvků (Cr, Cu, Mo, Ni) maximálně do 0,7%, s možným zvýšením obsahu mědi a cínu z důvodu lepší tvářitelnosti a svařitelnosti. Desoxidace pomocí hliníku tak, aby byl obsah hliníku min. 0,02%. Zvyšuje se obsah manganu (do 1,7%) a používá se mikrolegování niobem, titanem nebo vanadem. [7] [12]

Při desoxidaci oceli pomocí hliníku vytváří hliník disperzní nitridy, které zlepšují vlastnosti nízkouhlíkových ocelí. Zabraňují zkřehnutí (stárnutí) oceli, zvyšují odolnost vůči koroznímu praskání, napomáhají ke vzniku jemnozrné struktury s vyšší mezí kluzu a způsobují částečné precipitační zpevnění feritu. Maximální pracovní teplota nelegovaných ocelí P235GH a P265GH je 350 až 425 °C a pro oceli P295GH a P355GH je

to obvykle teplota 450 °C. Mez kluzu těchto ocelí je volena jako kritérium pro pevnostní výpočet, jelikož do teploty 350 až 400 °C je menší než mez tečení. Tyto oceli se využívají k výrobě potrubí, parních kotlů, armatur a různých tvářených součástí, jako jsou např. dna nebo příruby. [7] [12]

Žáropevnost nízkolegovaných ocelí je zajištěna především legováním feritu, zjemněním zrna, precipitačním zpevněním a příznivě působí také bainit. Žáropevné tvářené oceli se vyznačují nízkým obsahem uhlíku (do 0,2%) a legují se chromem, molybdenem a wolframem. Žáropevné oceli na odlitky jsou tvořeny obdobným chemickým složením, avšak z důvodu lepší slévateľnosti mají vyšší obsah manganu a křemíku. Tepelné zpracování legovaných ocelí je obvykle kombinace normalizačního žíhání (při 920 až 980 °C) a vysokoteplotního popouštění (při 630 až 720 °C). Používají se v rozmezí teplot 450 až 590 °C. [7]

Samostatnou skupinou žárovevných legovaných ocelí jsou oceli, které odolávají stlačenému vodíku pro využití v petrochemickém průmyslu. Přejchod do této skupiny ocelí tvoří ocel 13CrMo4-5, která má odolnost proti vodíku asi do teploty 350 °C. Nejlepší odolnost vůči vodíku (do 540 °C) má ocel 20CrMoV13-5-5. [7]

Zmíněné nízkolegované oceli mají dobrou tvářitelnost za tepla a obrobiteľnost. Svařitelnost se klasifikuje jako zaručená - podmíněná, neboť podle úrovně legování a tloušťky materiálu je nutno aplikovat přehřev 200 až 400 °C. Po svařování je nutné žíhání za stejných teplot, které se používají pro popouštění. [7]

Tabulka č. 5. Vybrané nelegované (UQ) a nízkolegované (LE) oceli pro vyšší teploty a oceli žárovevné [7]

Označení ČSN EN	Označení DIN EN	Druh	R _m , R _{p0,2} ¹⁾		R _T 10 ⁵ /1/T	
			[MPa]	[°C]	[MPa]	[°C]
P235GH	1.0345	UQ	110	400	30	480
P265GH	1.0425	UQ	130	400	30	480
P295GH	1.0481	UQ	155	400	30	500
P355GH	1.0473	UQ	180	400	30	500
16Mo3	1.5415	LE	140	500	35	530
13CrMo4-5	1.7335	LE	165	500	30	560
10CrMo9-10	1.7380	LE	180	500	30	580

1.3.2 Vysokopopuštěné martenzitické

Složení vysokopopuštěných martenzitických ocelí je obdobné jako u předchozích skupin žárovevných ocelí. Rozdíl je ve vyšším obsahu chromu, který zlepšuje odolnost proti oxidaci a oduhličení v prostředí stlačeného vodíku. V případě ocelí vysokolegovaných navíc přibývá transformační zpevnění a zpevnění precipitační pomocí Lavesových fází. [7] [12]

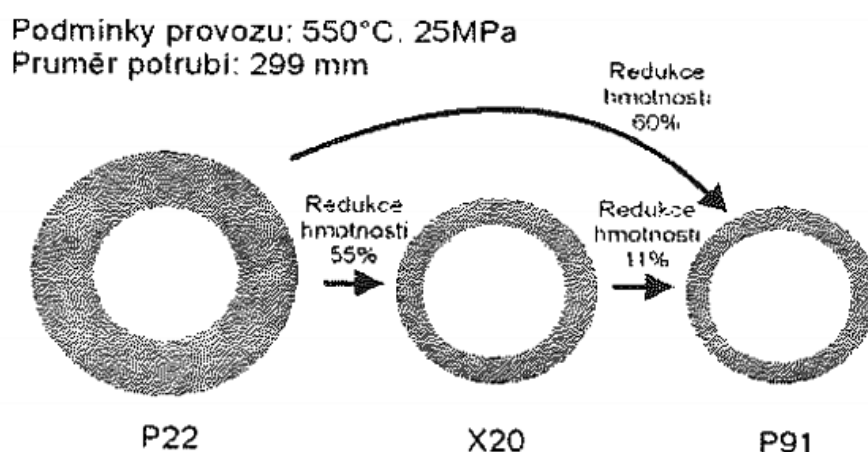
Vysokolegované chromové žárovevné oceli vycházejí z klasických korozivzdorných ocelí s obsahem chromu 12% a obsahem uhlíku do 0,2%. Jsou modifikovány přísadami Mo, V, W, Ti a Nb. Tyto přísady vytváří stabilní disperzní karbidy typu MC a M_2C , které jsou stabilnější než chromové karbidy $Cr_{23}C_6$ a také tvoří intermetalické Lavesovy fáze. Stejně jako klasické oceli se i modifikované oceli zušlechťují. Kalení probíhá za vyšších teplot (1020 až 1070 °C), aby došlo k rozpuštění karbidů v austenitu, a provádí se do oleje. Následným vysokoteplotním popouštěním (700 až 770 °C) dochází ke vzniku sorbidu. Kromě sorbidu obsahují tyto oceli přesycený δ ferit, který u tvářených ocelí vytváří řádkovou strukturu. Pokud je podíl feritu vyšší, tak je ocel anizotropní a důsledkem precipitace karbidů v δ feritu je také křehká. V tabulce 6. jsou uvedeny příklady modifikovaných ocelí, které zastupuje např. ocel X20CrMoV11-1 a její varianta na odlitky GX23CrMoV12-1. Tyto oceli mají při provozních teplotách velké vnitřní tlumení, které zvyšuje jejich odolnost proti únavě. Mají vysokou prokalitelnost, dostačující obrobiteľnosť a při dodržení technologických postupů podmíněnou svařitelnost. [7] [12]

Tabulka č. 6 Vybrané středně legované a vysokolegované žárovevné oceli [7]

Označení ČSN EN	Chemické složení	Použití	Nejvyšší teplota [°C]
1.4718	X45CrSi9-3	ventily spalovacích motorů	650
1.4922	X20CrMoV11-1	lopatky a rotory turbín	625
1.4941	XGCrNiTiB18-10	přehřívákové trubky, součásti armatur, šrouby a matice	650
1.4959	X8NiCrAlTi32-21	lopatky a rotory plyn. turbín	750
1.7366	X16CrMo5-1	zařízení pro krakování ropy	550
1.4903	X10CrMoVNb9-1	zařízení pro prostředí H_2S	600

Chromové středně legované oceli obsahují 5 až 10% chromu, 0,5 až 1% molybdenu a občas vanad a wolfram. Používají se na součásti zařízení při zpracování ropy, nebo také při práci se stlačeným vodíkem nebo sirovodíkem za vyšších teplot. Jejich maximální provozní teploty jsou 550 až 600 °C. [7] [12]

Nové martenzitické oceli nacházejí značné uplatnění při modernizaci energetických zařízení. S ohledem na jejich nevýrazně vyšší cenu v porovnání se standardními oceli je možné značné snížení tloušťky stěn potrubí a s tím související snížení hmotnosti. Díky tomu dochází ke značným technickým a ekonomickým efektům (obr. č. 3). [7] [12]



Obrázek č. 3 Změna tloušťky trubky v závislosti na použité oceli [12]

1.3.3 Austenitické oceli

Austenitické oceli jsou skupinou vysokoteplotních materiálů, které splňují konstrukční požadavky v teplotních intervalech od 550 do 700 °C. Austenitická struktura má na rozdíl od feritické struktury lepší žáropevnost i žáruvzdornost. Ocel s austenitickou strukturou je tvořena krychlovou plošně středěnou mřížkou, ve které probíhají difuzní pochody i za zvýšených teplot pomaleji. Díky tomu mají austenitické oceli vyšší mez tečení a strukturní stabilitu. Vhodným legováním, zejména pomocí chromu a niklu, si zachovávají zpevnění legováním a zpevnění precipitační do vysokých teplot. K precipitačnímu zpevnění přispívají nejen karbidy, ale i intermetalické fáze. Nevýhodou austenitických ocelí je vyšší teplotní roztažnost a menší součinitel tepelné vodivosti. Avšak mají vysokou odolnost proti koroznímu praskání a mezikrystalové korozi. Austenitické žáropevné oceli se využívají zejména při konstrukci komponent tepelných elektráren pro práci v korozních prostředích, kde již není možné použít oceli feritické. [4] [7] [12]

Převážné množství žárovevných austenitických ocelí tvoří oceli chromniklové. Jsou odvozeny od korozivzdorných austenitických ocelí typu CrNi18-9, které jsou žárovevné jen do teplot 550 až 600 °C. Dle složení je nejbližším typem ocel CrNi18-10 s vyšším obsahem niklu a přísadou titanu, která má lepší strukturní stabilitu a je použitelná do 650 °C a její odolnost proti tečení je lepší, než u 12% Cr modifikovaných ocelí. Lepší žárovevnosti dosahují oceli typu CrNi16-13, nebo CrNi16-16, které obsahují vytvrzující přísady Mo, Nb, Ti a W. [4] [7]

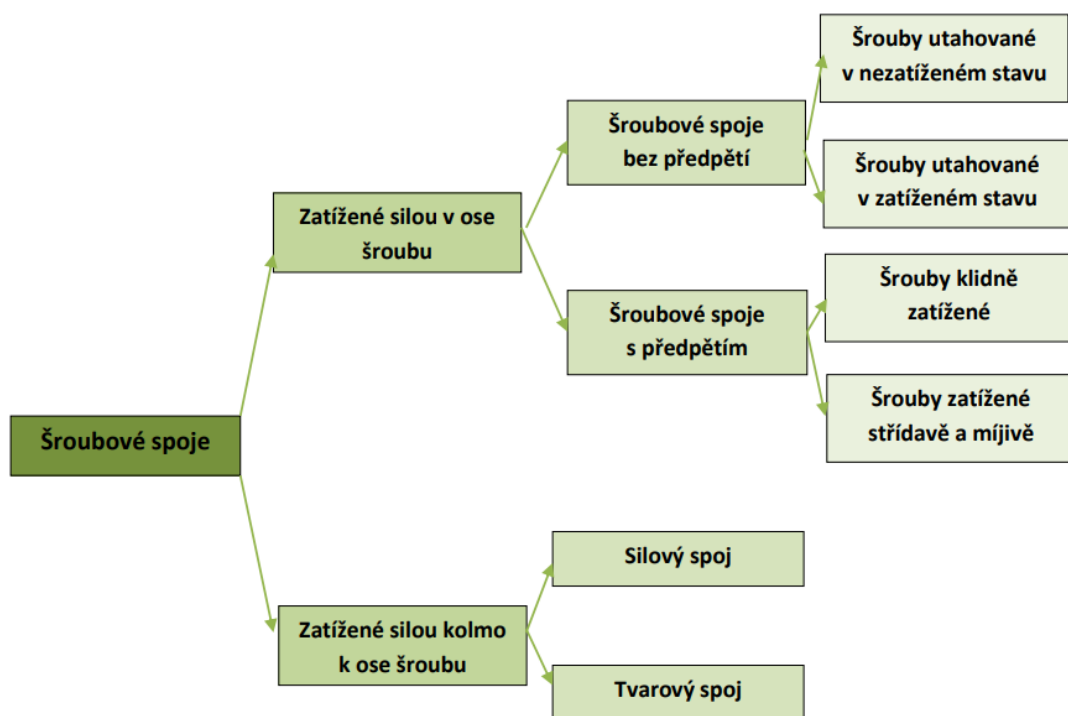
Méně využívanou skupinou jsou mangan-chromové austenitické oceli. Tyto oceli neobsahují nikl a z toho důvodu jsou ekonomicky výhodnější. Jejich výhodou je vysoká odolnost v prostředí sloučenin síry. Pro vyšší stabilitu austenitu se občas přidává malé množství dusíku a ke zlepšení odolnosti proti tečení se přidává tantal, niob, titan a vanad.

Obvyklým tepelným zpracováním žárovevných austenitických ocelí je rozpouštěcí žíhání za teplot 1000 až 1200 °C s následným ochlazením na vzduchu (v případě tlustších součástí ochlazení ve vodě). Ocel typu CrNi16-13 se precipitačně zpevňuje, takže po rozpouštěcím žíhání následuje umělé stárnutí (750 až 882 °C po dobu 1 až 5 hodin) s ochlazením na vzduchu. [4] [7]

2. ŠROUBOVÉ SPOJE

Šroubové spoje jsou základní konstrukční prvky využívané ve všech odvětvích průmyslu. Jedná se o spoje rozebíratelné sloužící pro spojování konstrukcí, strojních součástí a jejich dílů. Šrouby se dělí podle funkce na šrouby spojovací a pohybové. Šrouby spojovací jsou využívány ke spojování dvou, nebo více součástí s možností jejich zpětného rozebrání. Šrouby pohybové se využívají ke změně otáčivého pohybu na pohyb posuvný a naopak. [14]

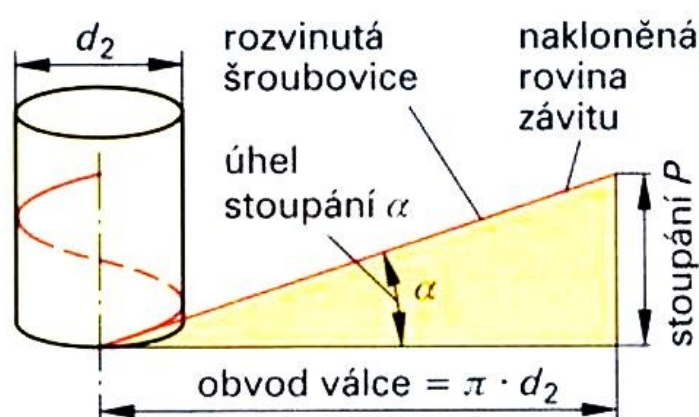
Klasický šroubový spoj se skládá ze šroubu, matice a podložky. Součásti jsou pevně sevřeny mezi hlavou šroubu a maticí. Klasický šroub lze nahradit šroubem svorníkovým, přičemž funkci hlavy šroubu zastupuje druhá matice s podložkou. Důležitou vlastností šroubů je samosvornost. Samosvornost šroubu znamená, že nesmí při působení osově síly dojít k jeho uvolnění. Šroubové spoje jsou spoje se silovým stykem a mohou přenášet silové zatížení, které může působit jak ve směru osy, tak i kolmo k ose šroubu. Rozdělení šroubových spojů podle způsobu zatížení je zobrazeno na obrázku 4. Většina šroubových spojů využívaných v praxi jsou spoje s předpětím. Předepjaté spoje jsou již při montáži zatíženy velkou vnitřní osovou silou (předpětím), která zajistí potřebné silové vazby na stykových plochách spojovaných materiálů. [14] [15]



Obrázek č. 4 Rozdělení šroubových spojů podle způsobu zatížení [15]

2.1 Závity

Závit tvoří funkční a zároveň nejdůležitější část šroubu. Funkční částí šroubu je závit vnější a v případě matice tvoří funkční část závit vnitřní. Závit tvoří nakloněná rovina, která je navinutá na vnější válcovou plochu (šroub), nebo na vnitřní válcovou plochu (matice). Z toho vyplývá, že závit je tvaru šroubovice. Základní parametry závitu lze definovat na pravoúhlém trojúhelníku (obr. č. 5), který vznikne rozvinutím této šroubovice do roviny. Úhel, který svírá rozvinutá šroubovice a delší odvěsna (obvod válcové plochy) se nazývá úhel stoupání závitu. Délka kratší odvěsny určuje velikost stoupání závitu. [15] [16]



Obrázek č. 5 Rozvinutá šroubovice [16]

V praxi jsou používány různé druhy závitů, které se dělí do skupin podle určitých kritérií. Závity se mohou dělit například: [15]

Podle smyslu otáčení

- pravé závity
- levé závity

Podle počtu chodů (počtu navinutých profilových šroubovic)

- jednochodé
- vícechodé

Podle tvaru závitového profilu

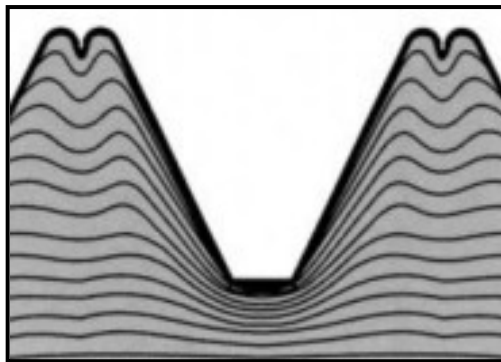
- Metrický závit „M“
- Whitworthův závit „W“
- Trubkový závit „G“
- Lichoběžníkový rovnoramenný „TR“
- Lichoběžníkový nerovnoramenný „S“

2.1.1 Výroba závitů

Ve strojírenské výrobě se setkáváme s různými druhy závitů, které slouží například k tvorbě rozebíratelných spojů, pohybových šroubů strojů a zařízení, nebo měřidel. Podle způsobu využití závitů a jejich vyráběného množství se odvíjí také jejich způsob výroby. Principem výroby závitů, ať už vnějších nebo vnitřních, je tvorba šroubovitě drážky na základním válcovém tělese. K tvorbě závitů se používají dva základní technologické procesy, kterými je třískové obrábění a tváření. Při obrábění dochází k odstraňování materiálu ze závitové drážky. Při výrobě tváření nedochází k odstraňování materiálu, ale pouze k jeho vytlačování ze závitové drážky. Způsob výroby má značný vliv na výsledné mechanické a funkční vlastnosti závitu. [17]

Obecně lze říct, že při použití třískového obrábění, ve srovnání s tváření, je kvalita výsledného závitu nižší. Výsledná jakost povrchu závitu závisí zejména na geometrii břitu nástroje, řezné rychlosti, kvalitě nástroje a jeho naostření, opotřebením nástroje, nebo také na chladicí kapalině. Drsnost povrchu se měří obtížně a většinou jen vizuálně. I když je výsledná jakost obráběných povrchů nižší, v mnoha případech je zcela dostačující. [18]

Hlavní výhodou tváření závitů je zlepšení kvality jejich povrchu a vysoká produktivita. Na rozdíl od třískového obrábění nedochází k přerušování vláken materiálu (obr. č. 6), ale ke zpevnění povrchu, čímž dochází ke zvýšení pevnosti v tahu (až o 15%) a až k dvojnásobnému zvýšení meze únavy. Zpevnění zvyšuje také odolnost povrchu proti otěru, díky čemu se zvyšuje životnost závitu. Při tváření vnitřních závitů je výhodou, že nedochází k tvorbě třísek, které by mohly ucpávat nástroj a mohlo by dojít k poškození závitu i nástroje. Pro tváření závitů jsou vhodné materiály, které mají dobrou tvárnost za studena a tažnost minimálně 10%. Vhodné jsou slitiny hliníku, měď, měkké mosazi a oceli s pevností do 500 MPa. Pro tváření závitů jsou nevhodné křehké neželezné materiály, litiny a martenzitické a chromniklové oceli s pevností nad 1000 MPa. [17] [18]



Obrázek č. 6 *Průběh vláken tvářeného závitu [18]*

TŘÍSKOVÉ OBRÁBĚNÍ ZÁVITŮ

Ruční řezání závitů

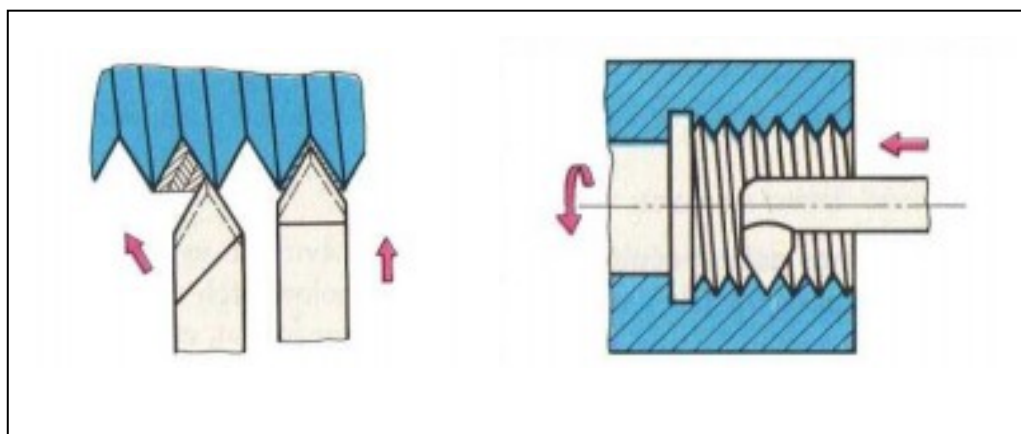
Využívá se pro výrobu závitů menších průměrů. K výrobě se používají závitové čelisti (závity vnější) a závitníky (závity vnitřní). Ruční závitníky se obvykle vyrábí v sadách tří kusů, kdy každý závitník odebírá pouze určitou část průřezu závitu. [17]



Obrázek č. 7. *Nástroje pro ruční řezání závitů [17]*

Řezání závitů na soustruhu

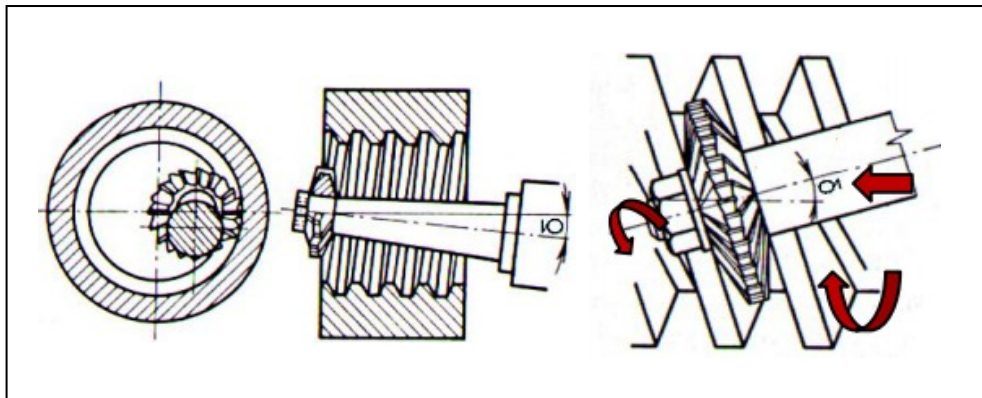
K řezání závitů se používají soustružnické nože, jejichž profil je shodný s profilem závitové mezery. Na soustruhu je možné řezat jak závit vnější, tak závit vnitřní. Jsou používány soustružnické nože radiální, které jsou jednoprofilové, nebo tangenciální a kotoučové, které jsou víceprofilové. Soustružení slouží obvykle k výrobě závitů vysoké přesnosti, jako jsou například závity kalibrů. [17]



Obrázek č. 8 *Soustružení závitů radiálními noži (zleva: přímý nůž, vnitřní nůž) [17]*

Frézování závitů

Výroba závitů frézováním patří k velmi produktivním způsobům. K frézování se používají frézy tvarové kotoučové, válcové hřebenové, okružovací, nebo vrtací závitořezné frézy, které umožňují vrtat otvor a vytvořit závit v jedné operaci. [18]

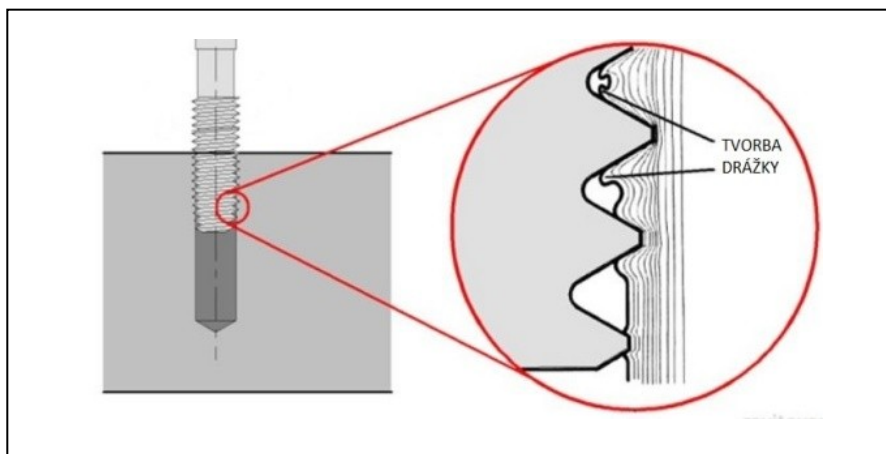


Obrázek č. 9 Frézování závitů kotoučovou frézou [18]

TVÁŘENÍ ZÁVITŮ

Tváření závitů tvářecím závitníkem

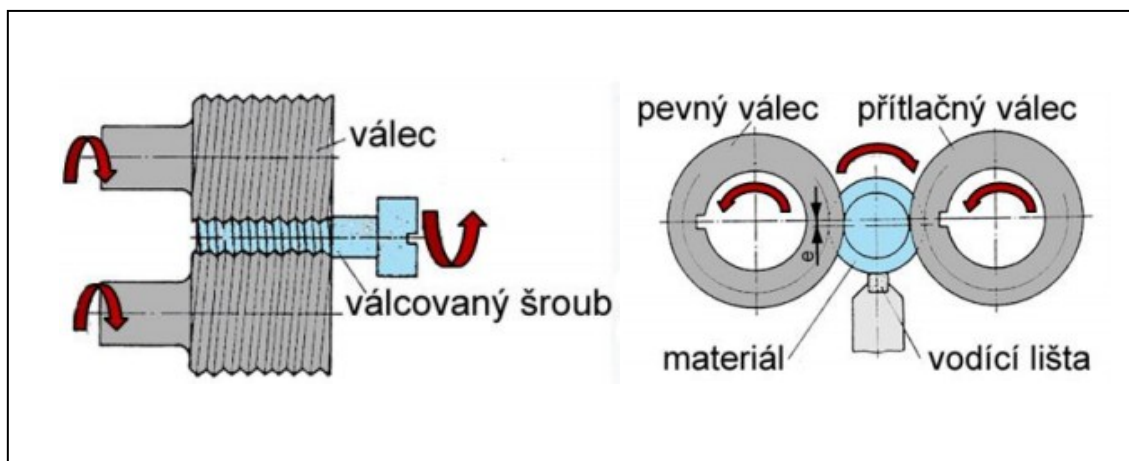
Při výrobě závitu pomocí tvářecího závitníku dochází ke vtlačování závitníku do obráběného materiálu. Při vtlačování dochází ke vzniku tepla, měknutí materiálu a jeho zatékání do profilu závitníku. Vzniká závitový profil, na jehož vrcholu se tvoří drážka, podle které lze rozeznat závit tvářený od závitu řezaného (viz obr. č. 10). Rozdíl v průběhu vláken tvářeného a řezaného závitu je zobrazen v příloze č. 4. [19]



Obrázek č. 10 Výroba závitu tvářecím závitníkem [19]

Tváření pomocí válcovacích kotoučů

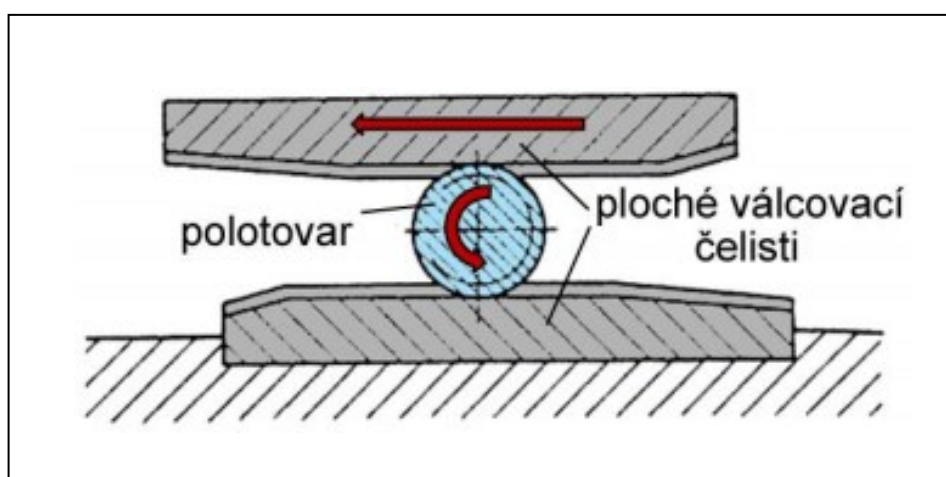
K tvorbě závitu dochází pomocí dvou válcovacích kotoučů, které se odvalováním zatlačují pomocí hydrauliky do polotovaru. Profil kotoučů odpovídá negativu požadovaného závitu. [19]



Obrázek č. 11 *Tváření závitu válcovacími kotouči [19]*

Tváření závitu plochými válcovacími čelistmi

Závit vzniká pomocí dvou, proti sobě umístěných plochých čelistí, na kterých je vytvořen závitový profil. Jedna čelist je pevná a druhá posuvná. Drážky profilu čelistí jsou nakloněny dle požadovaného stoupání závitu. [19]

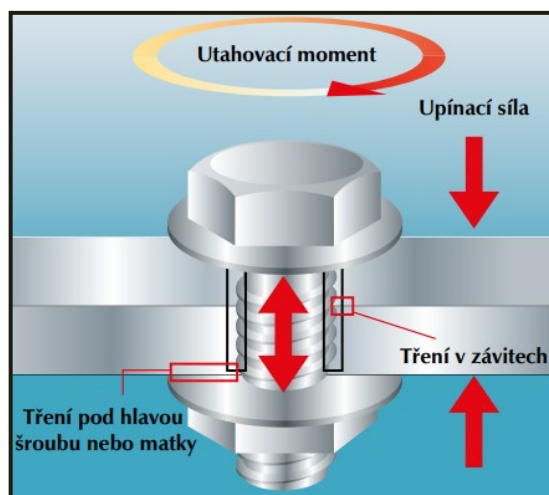


Obrázek č. 12 *Ploché válcovací čelisti [19]*

2.2 Montáž šroubových spojů

Správná montáž šroubových a přírubových spojů má zásadní vliv na výslednou kvalitu a funkční vlastnosti spojů tlakových zařízení. Bylo zjištěno, že největší částí se na správné funkci spoje podílí lidský faktor. Výsledná funkčnost spoje závisí až v 50% na správném provedení montážních prací. Z toho důvodu byla v roce 2014 zavedena norma ČSN EN 1591-4:2014 „Kvalifikace odborné způsobilosti personálu k montáži šroubových spojů v tlakových zařízeních v kritických aplikacích“, jejíž cíl je zajistit kvalitu montážních prací a snížit podíl lidského faktoru na správném výsledku. [20]

Pro správnou montáž šroubových spojů je nutno znát základní pojmy, které mají zásadní vliv na jejich funkci a s montáží šroubových spojů úzce souvisí. K těmto základním pojmům patří utahovací moment, předpínací a upínací síla, tření a tvrdost šroubového spoje. [21]



Obrázek č. 13 Definice šroubového spoje [21]

1. Utahovací moment

Utahovací moment je veličina uvažovaná při procesu šroubování. Je to moment nutný k dosažení potřebného předpětí šroubového spoje. Je definován násobkem dvou fyzikálních veličin, který mi jsou síla [N] a dráha [m]. Jednotkou je Newtonmetr. [21]

2. Předpínací (upínací) síla

Síla, kterou je potřeba pomocí šroubového spojení dosáhnout. Upínací síla vyvozuje přítlak, který působí mezi spojovanými součástmi. Tlakem se zvyšuje tření, které zabraňuje samovolnému uvolnění. Předpínací síla působí ve šroubu a měří se pouze laboratorně, nebo ultrazvukovou metodou. [21]

3. Tření

Na utahování šroubových spojů má největší vliv tření pod hlavou šroubu nebo matky a tření v závitech. Velikost tření závisí na materiálu, třecích plochách a jejich opracování. Třecí síla působí proti směru utahovacího momentu. To znamená, že zabraňuje tomu, aby se utahovací moment plně přeměnil na předpínací sílu. [21]

4. Tvrdost šroubového spoje

Ve chvíli, kdy při utahování dosedne hlava šroubu na jednu ze spojovaných součástí, je možné ještě šroubem pootočit do chvíle, kdy je dosaženo potřebného utahovacího momentu. Je-li toto pootočení, měřené v úhlových stupních malé, jedná se o tvrdý šroubový spoj. Je-li velké, jde o měkký šroubový spoj. Tvrdost je ovlivněna pevností spojovaných materiálů, počtem spojovaných dílů, nebo použitím pojistných systémů. [21]

Problematika montáže šroubových spojů

Nejvíce problematickou částí montáže šroubových spojů je volba utahovacího momentu pro vyvození správného předepjetí šroubu. Převážná většina použitého utahovacího momentu je pohlcena třením. Největší část je pohlcena třením pod maticí, nebo hlavou šroubu (50-55%). Menší část je pohlcena třením v závitech (35-40%) a pouze malá zbývající část (asi 10%) je přeměněna na předpínací sílu. Obecně platí, že čím měkký šroubový spoj je, tím jsou ztráty způsobené třením nižší. Pro správný výpočet utahovacího momentu je důležité tyto podmínky tření správně odhadnout, a v praxi se jim co nejvíce přiblížit. [21] [22]

Dalším problémem souvisejícím se třením ve šroubových spojkách je, že hodnoty tření se mohou zvětšovat, případně mohou kolísat. Zvyšujícím zatížením může docházet k vytlačování maziva z místa kontaktu a změně hodnoty tření. Rozdílné hodnoty tření mohou způsobovat výkyvy výsledné napínací síly šroubů o více jak 50%. Proto je nutné šroubový spoj vždy navrhovat tak, aby v případě horní odchylky nebyl přetížen a při odchylce dolní, byla vždy dodržena potřebná předpínací síla. Avšak rozptyl hodnot tření je vhodné co nejvíce snížit. Velikost rozptylu může být ovlivněna například použitím vhodného maziva, nebo úpravou povrchu šroubů. [22] [23]

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

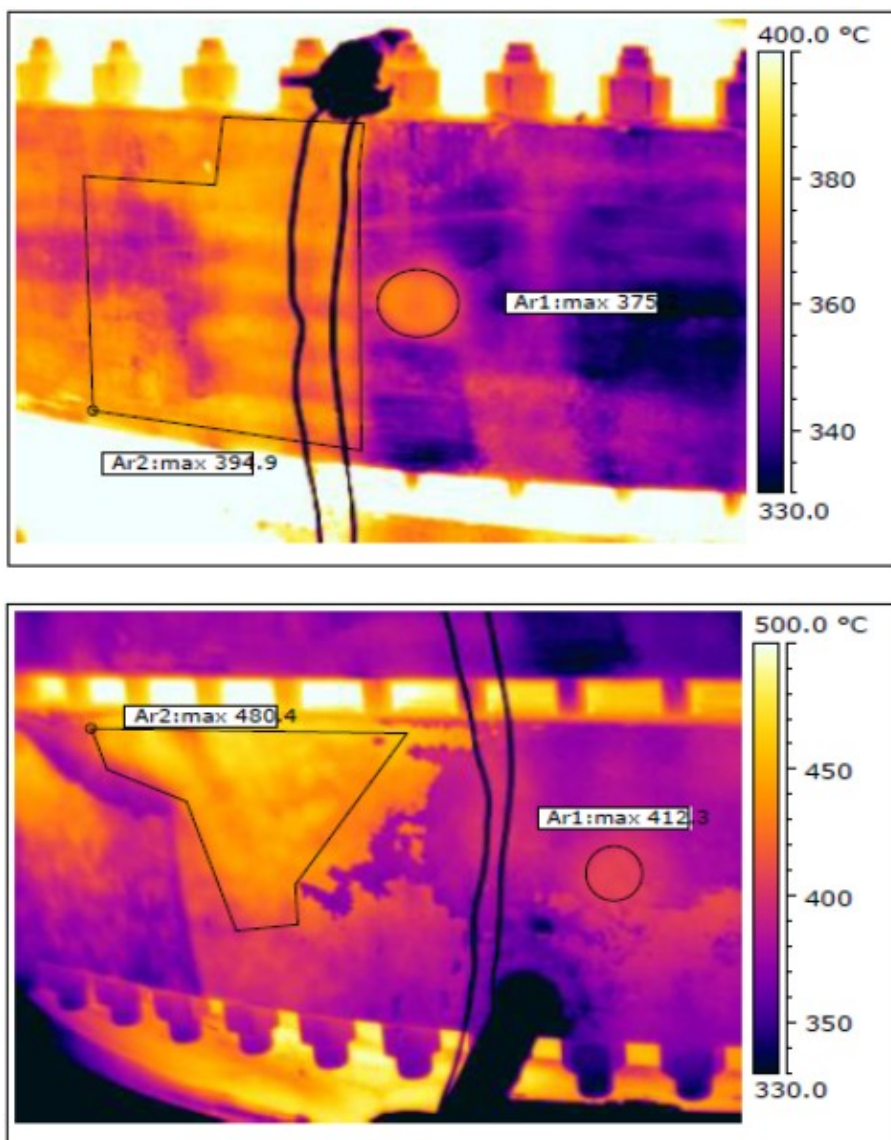
Experimentální část diplomové práce se zabývá změnou materiálových vlastností svorníkových šroubů. Zkoumané šrouby byly poskytnuty firmou Pokorný, spol. s r.o. Tato společnost se zabývá výrobou a distribucí průmyslových těsnění, řešením těsností přírubových spojů a poskytováním souvisejících služeb v oblastech chemie, petrochemie, plynárenství, energetiky, metalurgie, nebo potravinářství. [24]

Zkoumané svorníkové šrouby byly součástí zařízení pro výrobu kyseliny dusičné. Při jedné z částí tohoto výrobního procesu dochází ke spalování směsi vzduchu a čpavku při teplotách okolo 920 °C. Při tomto procesu došlo pravděpodobně k poškození tepelného štítu, který zajišťuje odstínění přírubového spoje od vysoké pracovní teploty procesu. Nesprávná funkce tepelného štítu měla za následek nerovnoměrné tepelné namáhání po obvodu přírubového spoje, což způsobilo jeho netěsnost.



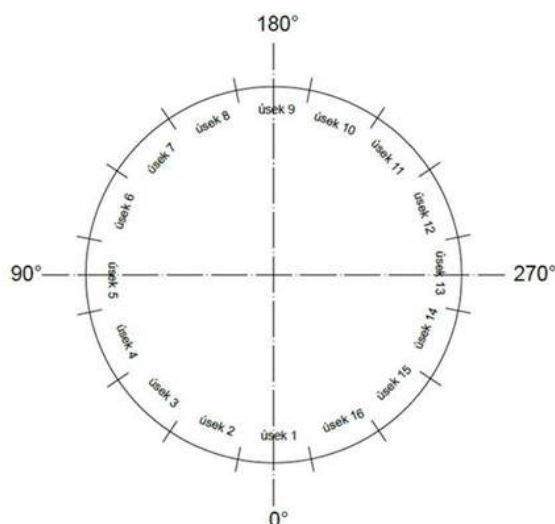
Obrázek č. 14 Úsek přírubového spoje č. 15

Svorníkové šrouby se nacházely v úseku přírubového spoje č. 15 (obr. č. 14). Rozdílné tepelné namáhání jednotlivých oblastí přírubového spoje bylo zjištěno pomocí snímků pořízených termokamerou. Snímky z termokamery se stupnicí snímané teploty jsou na obrázku č. 15.



Obrázek č. 15 Snímky z termokamery úseku č. 15

Daný přírubový spoj byl osazen 136 kusy svorníků velikosti M36x790 vyrobených z materiálu 21CrMoV5-7 (označení dle ČSN 15320) a maticemi z materiálu 25CrMo4. Bylo použito segmentové těsnění z materiálu Mica a závity svorníků byly mazány mazací pastou Depac. Nerovnoměrným působením vysokých teplot v jednotlivých oblastech přírubového spoje (viz obr. 16) došlo k tomu, že šroubové spoje v oblasti č. 15 nebylo možné běžným způsobem uvolnit a bylo nutné je odřezat. Pravděpodobnou příčinou tohoto jevu, a také netěsnosti spoje je deformace jak přírub, tak deformace samotných šroubů a také změna jejich materiálových vlastností. Působením vysoké teploty, která byla v oblasti č. 15 nejvyšší z celého přírubového spoje (480,4 °C), došlo k degradaci a vysušení mazací pasty, což také nepříznivým způsobem ovlivnilo uvolnění šroubů



Pozice	Úsek	Teplota [°C]
0°	1	266,7
22,5°	2	342,9
45°	3	410,5
67,5°	4	449,3
90°	5	444,2
112,5°	6	417,5
135°	7	339,0
157,5°	8	353,8
180°	9	342,7
202,5°	10	353,3
225°	11	336,5
247,5°	12	342,0
270°	13	353,8
292,5°	14	407,5
315°	15	480,4
337,5°	16	467,5

Obrázek č. 16 Schéma rozložení teplot po obvodu přírubového spoje

Předmětem zkoumání experimentální části diplomové práce jsou změny materiálových vlastností svorníkových šroubů (obr. č. 17), ke kterým došlo po zmíněném teplotním působení. Byla řešena změna mechanických vlastností materiálu šroubů a změna jejich materiálové mikrostruktury. V rámci zkoušení mechanických vlastností byla provedena zkouška tahem a následně bylo provedeno měření mikrotvrdosti. Výsledné hodnoty byly porovnány s hodnotami, které jsou uvedeny na daném materiálovém atestu šroubů. Následné metalografické hodnocení srovnává výslednou a předpokládanou mikrostrukturní morfologii.



Obrázek č. 17 Zkoumané šrouby
(vlevo šroub č. 1, vpravo šroub č. 2)

Materiál 21CrMoV5-7

Materiál s označením 21CrMoV5-7 (ČSN 15320) je nízkolegovaná žárovečná ocel, která je často používána k výrobě spojovacího materiálu pro vyšší teploty a součásti zařízení v energetickém průmyslu. Ocel byla vyvinuta v sedmdesátých letech na základě starší oceli 21CrMoV5-11, kdy dlouhodobé zkoušky tečení ukázaly, že obsah 0,7% Mo je dostačující. [25]

Pro ocel 21CrMoV5-7 je obsah niklu omezen na maximálně 0,6%, z důvodu zabránění dlouhodobého křehnutí. Pro velikosti průměru > 160 mm, je možné zlepšit kalící vlastnosti pomocí legování vyšším obsahem niklu (až do 0,8%, ocel označení 21CrMoNiV4-7). Chemické složení materiálu 21CrMoV5-7, které uvádí atest polotovaru šroubů (viz příloha č. 1) je zobrazeno v tabulce č. 8. [25]

Pro získání dobrých vlastností se jako tepelné zpracování obvykle používá kalení do oleje, nebo kalení s následným ochlazením na vzduchu. Austenitizační teplota se pohybuje v rozmezí 900-950 °C. Na kalení obvykle navazuje popouštění při teplotách 680-720 °C. Potřebnými vlastnostmi jsou dobrá houževnatost při pokojové teplotě, s kombinací dobré meze pevnosti při tečení a dobré tažnosti. [25]

Typická mikrostruktura: Obvykle se jedná o popuštěný bainit. Popuštěný bainit může obsahovat buď části popuštěného martenzitu, který je vlivem vysoké rychlosti ochlazení vyloučen na hranicích zrn, nebo při nízké rychlosti ochlazování části feritu vyloučeného ve středu zrna. [25]

Vysokoteplotní aplikace: Šrouby, matice, malé výkovky a části parních turbín, kompresory, plynové turbíny, ventily, trysky. Provozní teplota může být až 566 °C, pokud zanedbáme oxidaci, nebo je povrch upraven. Jinak je mezní teplota okolo 540 °C. [25]

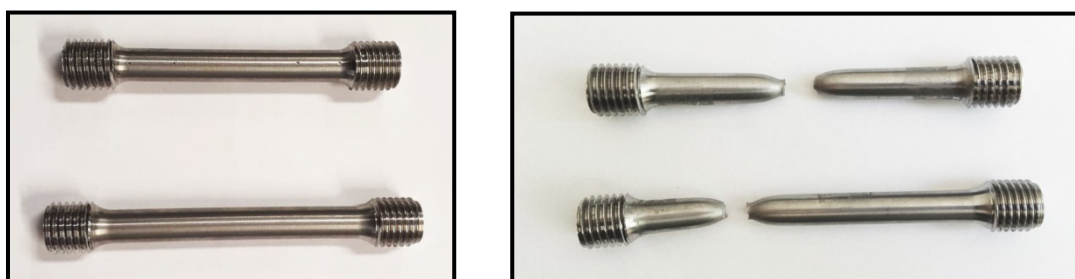
Tabulka 8. Chemické složení materiálu 21CrMoV5-7 [25]

CHEMICKÉ SLOŽENÍ [%]										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Min.	0,17	0,4	0,15	-	-	1,2		0,65	0,25	-
Max.	0,25	0,8	0,35	0,02	0,02	1,5	0,6	0,8	0,35	0,03
Rep.	0,2	0,73	0,33	0,012	0,007	1,35	0,14	0,66	0,26	0,024

3.1 Zkoušení mechanických vlastností

ZKOUŠKA TAHEM

Při zkoušení mechanických vlastností byla u zkoumaných šroubů nejprve provedena zkouška tahem. Z obou šroubů byly zhotoveny zkušební tyče se závitem (obr. č. 18). Zkušební tyče měly průměr 10 mm a délku 50 mm a byly vyrobeny z oblasti dříku šroubu. Následně byla na zkušebních tyčích provedena pomocí trhacího stroje zkouška tahem.



Obrázek č. 18 Zkušební tyče před a po zkoušce tahem

Po provedení zkoušky tahem byla zjištěna mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a zúžení obou vzorků. Průběh tahové zkoušky znázorňují tahové diagramy obou vzorků. Tahové diagramy jsou spolu s protokolem o zkoušení uvedeny v příloze č. 2 a č. 3. Z tahových diagramů lze říci, že oba vzorky vykazují obdobný průběh. Největší rozdíl vykazuje mez kluzu, ostatní výsledné hodnoty se od sebe liší minimálně. Srovnání naměřených hodnot a hodnot, které udává atest je zobrazeno v tabulce č. 9.

Tabulka č. 9 Výsledné hodnoty zkoušky tahem

	NAMĚŘENÉ HODNOTY			
	Mez kluzu Rp0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Zúžení Z [%]
Vzorek 1 - Atest	624	741	19,8	74
Vzorek 2 - Atest	615	734	20,2	74,8
Vzorek č. 11	682	733	23,8	74
Vzorek č. 22	682	727	24,4	75

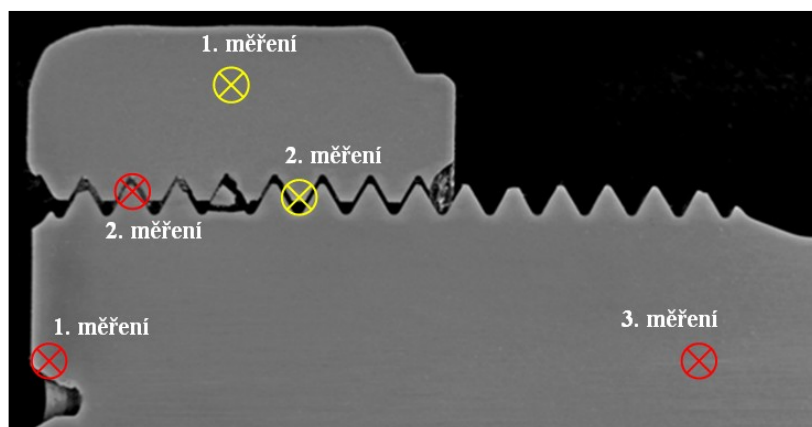
MĚŘENÍ MIKROTVRDOSTI

Následně byla v rámci zkoušení mechanických vlastností zjišťována mikrotvrdość. Byla provedena zkouška mikrotvrdości podle Vickerse s označením HV0,1. Symbol HV0,1 udává, že nominální hodnota zkušebního zatížení, které působí na čtyřboký jehlan je 0,9807 newtonů. Měření probíhalo pomocí tvrdoměru LECO Microhardness tester LM247AT.



Obrázek č. 19 Metalografické výbrusy šroubů a matic

Jako vzorky pro měření byly použity metalografické výbrusy (obr. č. 19), které byly před samotným hodnocením mikrotvrdości použity k metalografickému hodnocení mikrostruktury. Na obou šroubech bylo uskutečněno měření ve třech místech. Dále byla také provedena dvě měření mikrotvrdości matic příslušných šroubů.



Obrázek č. 20 Místa měření mikrotvrdości

U každého ze šroubů byla mikrotvrdość měřena v různých místech závitové části šroubu. Měření v každém místě bylo provedeno pomocí třech vpichů od sebe vzdálených jeden milimetr, ze kterých byl následně vypočten aritmetický průměr. První měření bylo

provedeno 3 mm od osy šroubu, ve vzdálenosti 1 mm od čela šroubu. Druhé měření proběhlo taktéž 3 mm od osy šroubu, avšak v úrovni předposledního závitu. Jako třetí a zároveň poslední, bylo provedeno měření tvrdosti v místě vrcholu závitů. Mikrotvrdost matice byla měřena obdobným způsobem jako u šroubů, pomocí třech vpichů vzdálených 1 mm od sebe. První měření v rámci matice bylo provedeno asi v polovině výšky matice 5 mm pod povrchem. Druhým měřením matice byla zjištěna mikrotvrdost vrcholu závitu matice. Místa, ve kterých byla mikrotvrdost měřena, jsou zobrazena na obrázku č. 20.

Z naměřených hodnot uvedených v tabulce 10 je patrné, že v měřených místech nedošlo k výraznější změně tvrdosti.

Tabulka č. 10 Naměřené hodnoty mikrotvrdosti HV_{0,1}

Mikrotvrdost podle Vickerse [HV 0,1]			
	1. měření	2. měření	3. měření
Šroub č. 1	247	262	253
Šroub č. 2	248	246	272
Matice č. 1	240	259	-
Matice č. 2	242	230	-

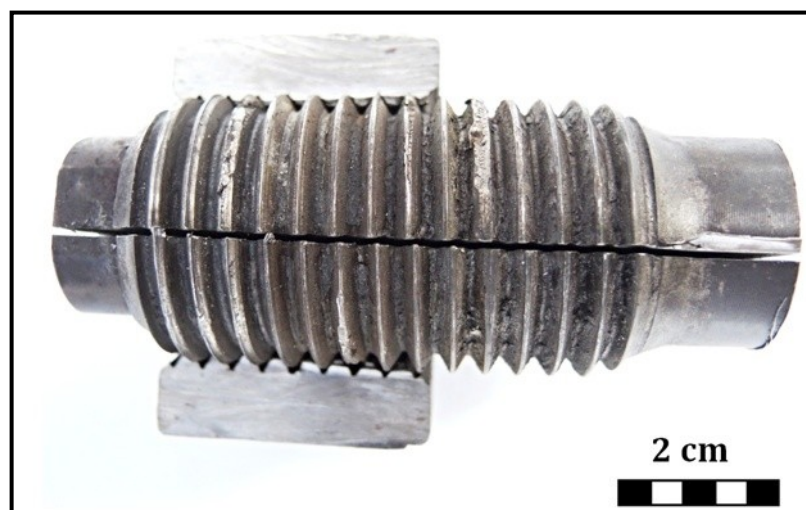
3.2 Metalografické hodnocení

V rámci metalografického zkoušení byly nejdříve hodnoceny povrchy jednotlivých šroubů a matic. Následně byly z obou šroubů a jejich matic vytvořeny vzorky pro metalografické hodnocení makrostruktury a mikrostruktury. Schéma odběru vzorků ukazuje obrázek č. 22.

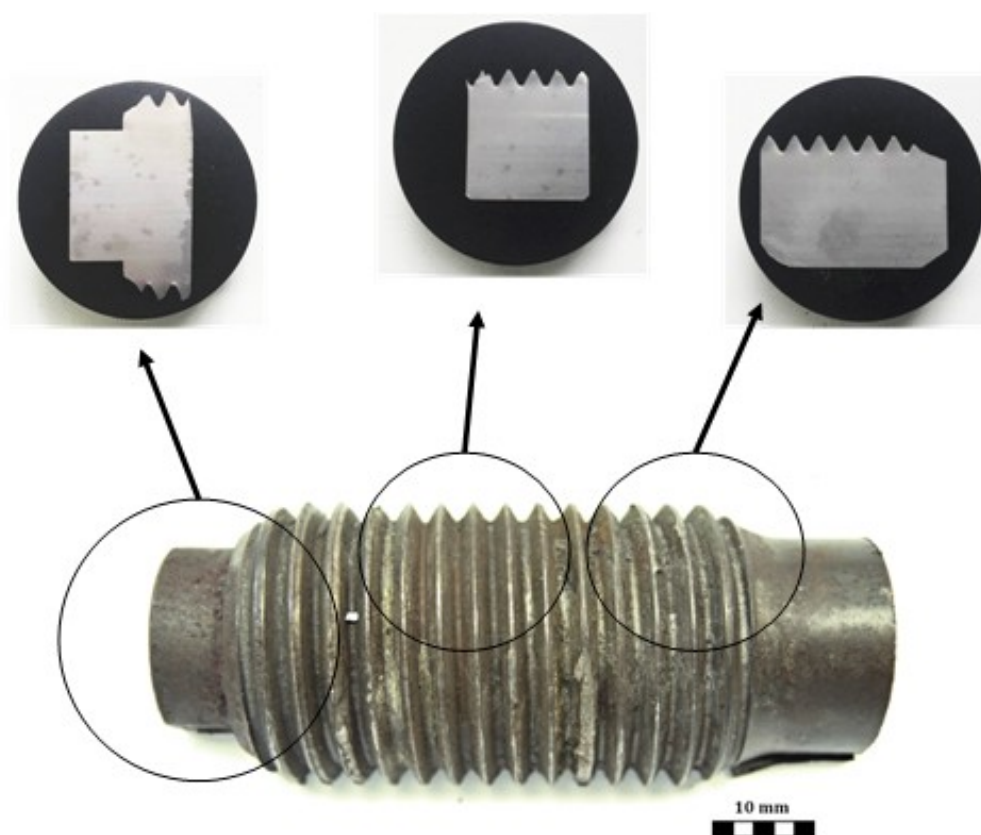
3.2.1 Šroub č. 1

Část šroubu v oblasti dříku vykazuje matný povrch s ojedinělými korozními oblastmi. Na povrchu je zjevná nerovnost, související s použitou technologií výroby daného šroubu. Povrch dříku šroubu nevykazuje další zjevné defekty. Závitová oblast šroubu vykazuje četná poškození závitového profilu (obr. č. 21). Jsou zjevná, již zoxidovaná, poškození staršího typu. Značné poškození závitu je pravděpodobně způsobeno opakovanou montáží

a demontáží šroubového spoje. Matice šroubu č. 1 má relativně čistý povrch a nejeví vážnější známky poškození. Na povrchu matice se vyskytují okuje a místy se vyskytuje náznak koroze. Závit matice nevykazuje značnější defekty.



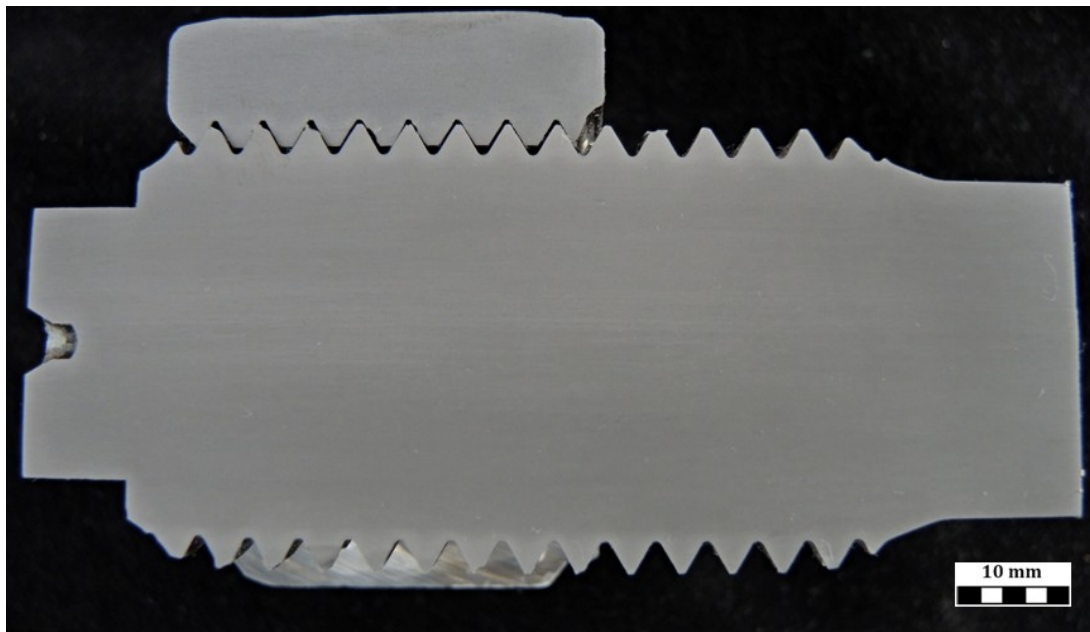
Obrázek č. 21 *Poškození závitového profilu šroubu č. 1*



Obrázek č. 22 *Schéma odběru vzorků pro hodnocení mikrostruktury*

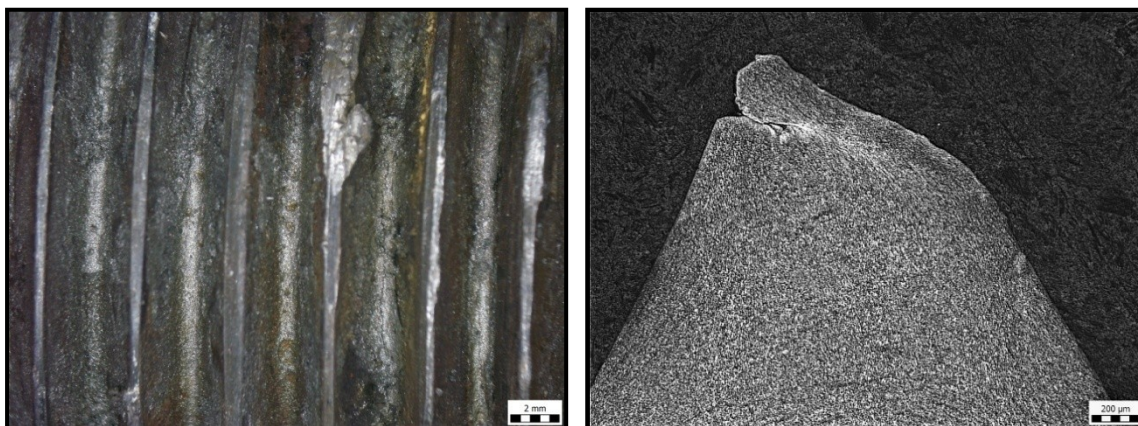
MAKROSTRUKTURA

Makrostruktura šroubu č. 1 vykazuje jemné vycezení v podélném směru šroubu. V oblasti závitů je zjevná světlejší barva (obr. č. 23). Světlejší barva materiálu je znakem deformace za studena vzniklé při tváření závitu.



Obrázek č. 23 *Makrostruktura podélného řezu šroubu č. 1*

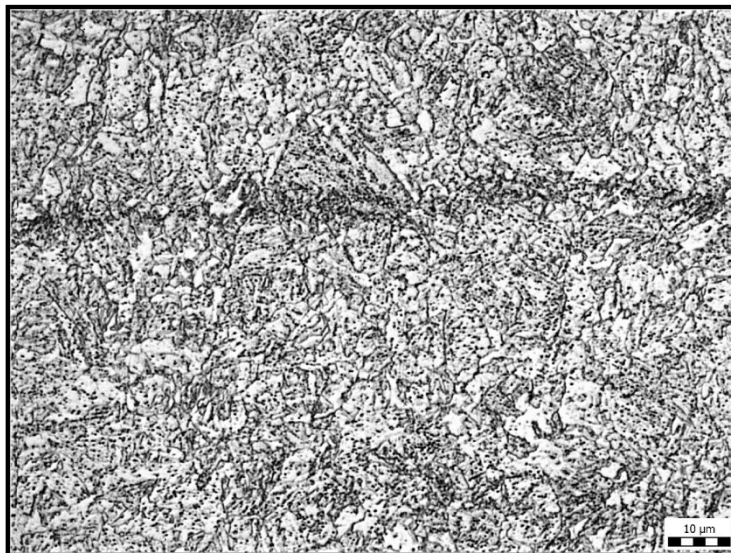
Ze snímků makrostruktury není zřejmé žádné tepelné ovlivnění šroubu ani matice. Na povrchu závitu jsou rozeznatelné zbytky mazací pasty na bázi grafitu. V poškozených místech a v náběhové části závitu se vyskytuje koroze. V závitové části se také vyskytují defekty ve tvaru záložek (obr. č. 24 vpravo), které souvisí s výrobou závitů tvářením. Tyto "záložky" by však mohly při montáži a demontáži mít vliv na vznik vážnějších defektů.



Obrázek č. 24 *Koroze závitu (vlevo), defekt tvaru záložky (vpravo)*

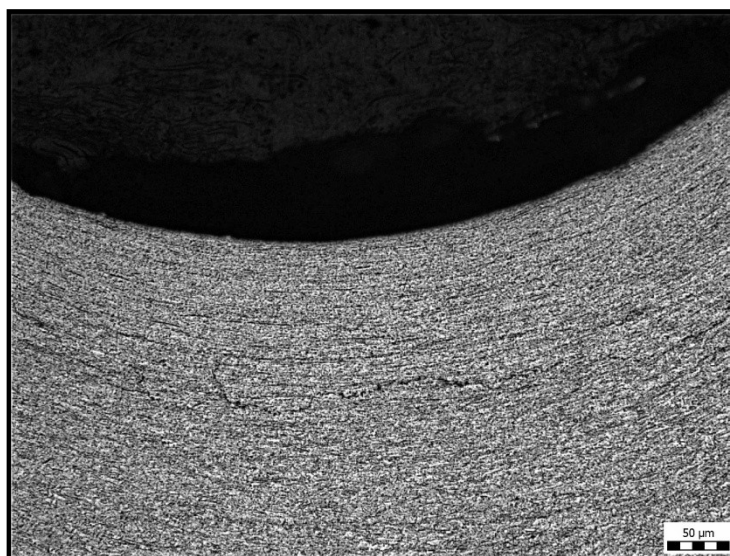
MIKROSTRUKTURA

Mikrostruktura šroubu č. 1 z oblasti dříku vykazuje rovnoměrnou řádkovitou strukturu. Jedná se o směs vysoce popuštěných základních struktur. V mikrostruktuře lze rozeznat četný výskyt precipitátů (obr. č. 25).



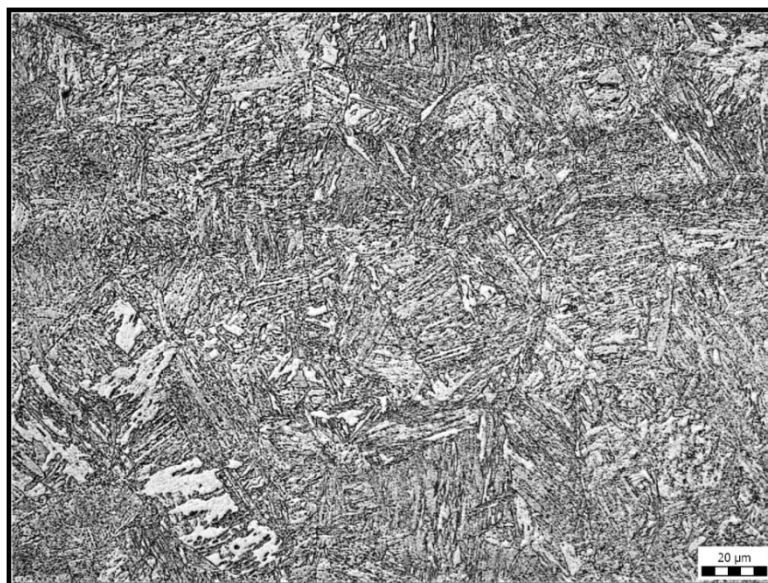
Obrázek č. 25 *Mikrostruktura dříku s četným výskytem precipitátů*

V oblasti kořene závitu je zřejmý směr průběhu vláken materiálu, který je charakteristický pro tvářené závity. Mikrostruktura v oblasti závitu je totožná s oblastí dříku, opět s četným výskytem precipitátů. U kořene závitu je možné rozeznat mikrotrhliny orientované ve směru vláken materiálu (obr. č. 26).



Obrázek č. 26 *Mikrotrhlina v oblasti kořene závitu*

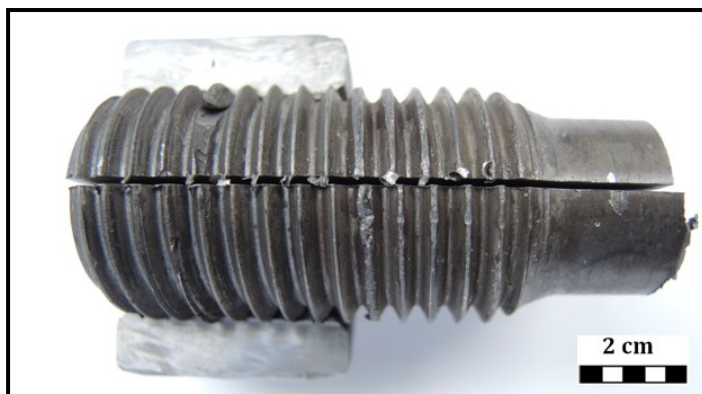
Taktéž byla zkoumána mikrostruktura matice příslušného šroubu, která je vyrobena z materiálu 25CrMo4. Matice vykazovala strukturu martenzitu popuštěného na střední pevnost (obr. č. 27). Na povrchu matice se vyskytovaly okuje a byl bez známek oduhličení.



Obrázek č. 27 Mikrostruktura materiálu matice

3.2.2 Šroub č. 2

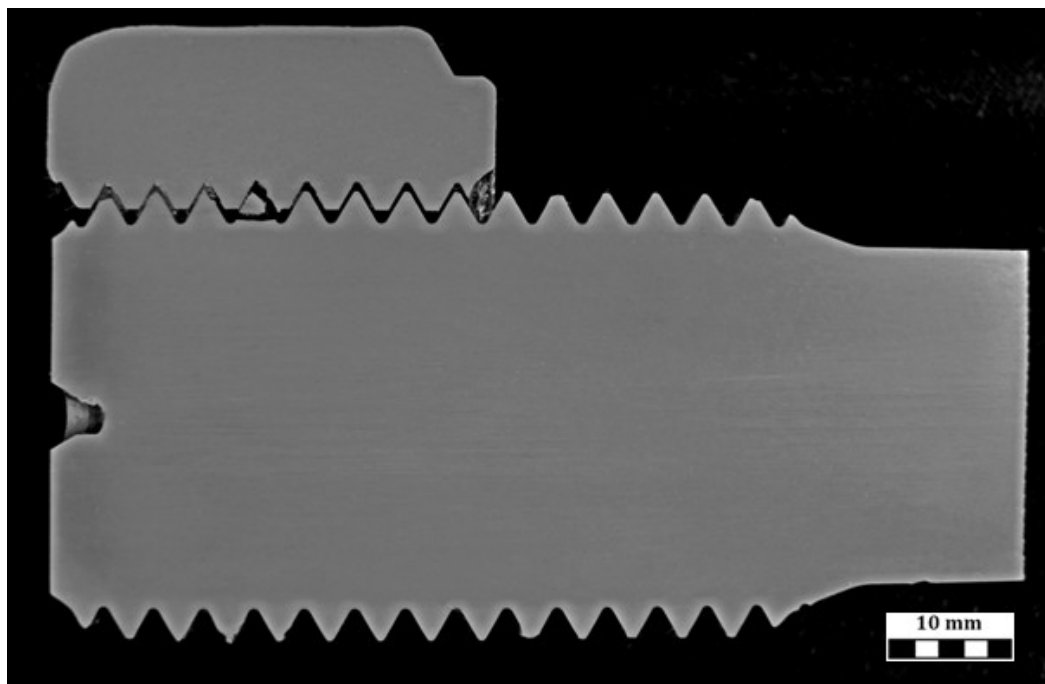
Dřík šroubu č. 2 vykazuje povrch kovové charakteristiky s ojediněle se vyskytujícími oblastmi koroze. Žádné další vady na povrchu dříku nebyly detekovány. Oblast závitu šroubu je značně poškozena (obr. č. 28). Poškozena je do takové míry, že část čtvrtého závitu úplně chybí (pravděpodobně byla utržena při demontáži šroubového spoje). Závitový profil obsahuje četné poškození nového i staršího typu, jehož příčinou je stejně jako u šroubu č. 1 opakovaná montáž a demontáž šroubového spoje. Matice je bez výraznější deformace, pouze s lehkým poškozením na čele, způsobeným podložkou.



Obrázek č. 28 Poškozený závitový profil šroubu č. 2

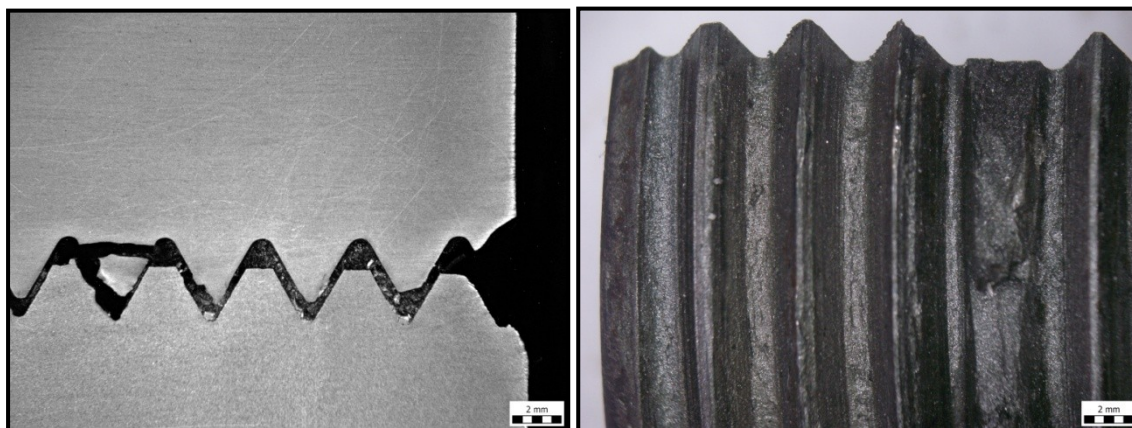
MAKROSTRUKTURA

Makrostruktura šroubu č. 2 jeví náznak jemných podélných vycezení. Na čele šroubu a v oblasti zubů závitu je možné pozorovat opět světlejší pásmo, které souvisí s deformací za studena (obr. č. 29). Na povrchu se ojediněle vyskytuje korozní napadení. Uvnitř závitu byl pozorován značný výskyt nečistot (obr. č. 30 vlevo).



Obrázek č. 29 *Makrostruktura šroubu č. 2*

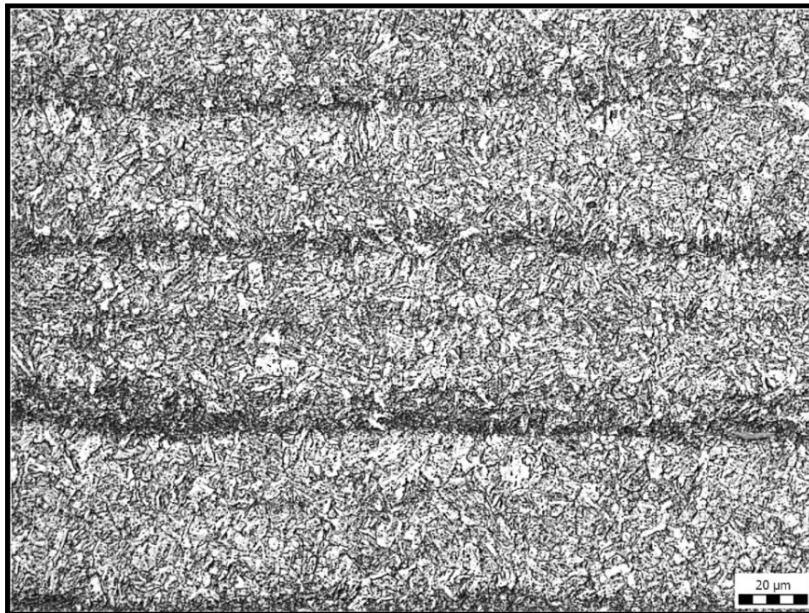
Na povrchu závitového profilu je možné pozorovat rýhy a mírné náznaky koroze. Dále je možné rozeznat poškození mechanického charakteru, které mohla způsobit podložka pod maticí při montáži. Na vrcholech závitu, stejně jako u šroubu č. 1, je pozorován výskyt záložek vzniklých při tváření závitového profilu.



Obrázek č. 30 *Výskyt nečistot (vlevo), utržená část závitu (vpravo)*

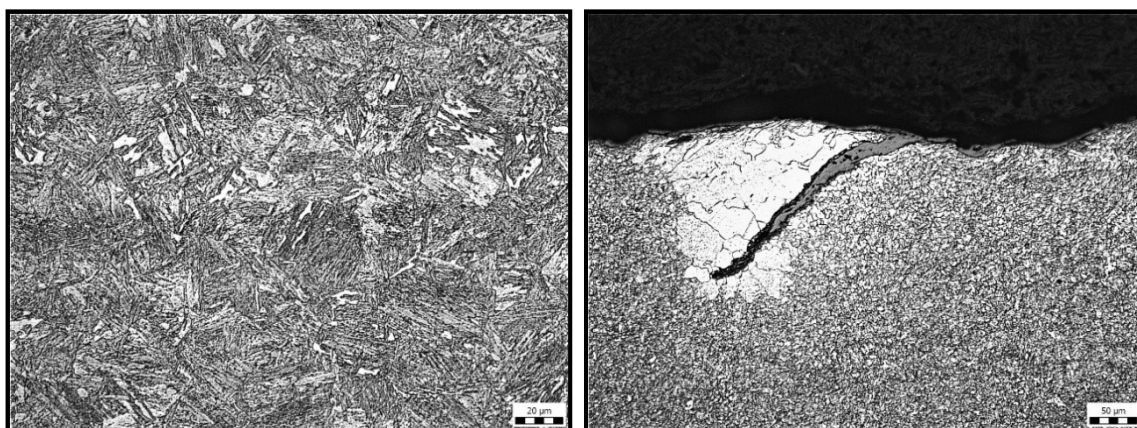
MIKROSTRUKTURA

Stejně jako u šroubu č. 1 je mikrostruktura šroubu č. 2 tvořena směsí základních popuštěných struktur. Orientace mikrostruktury je v celém šroubu rovnoměrná řádková (obr. č. 31). Je možné rozeznat přítomnost velkého množství precipitátů.

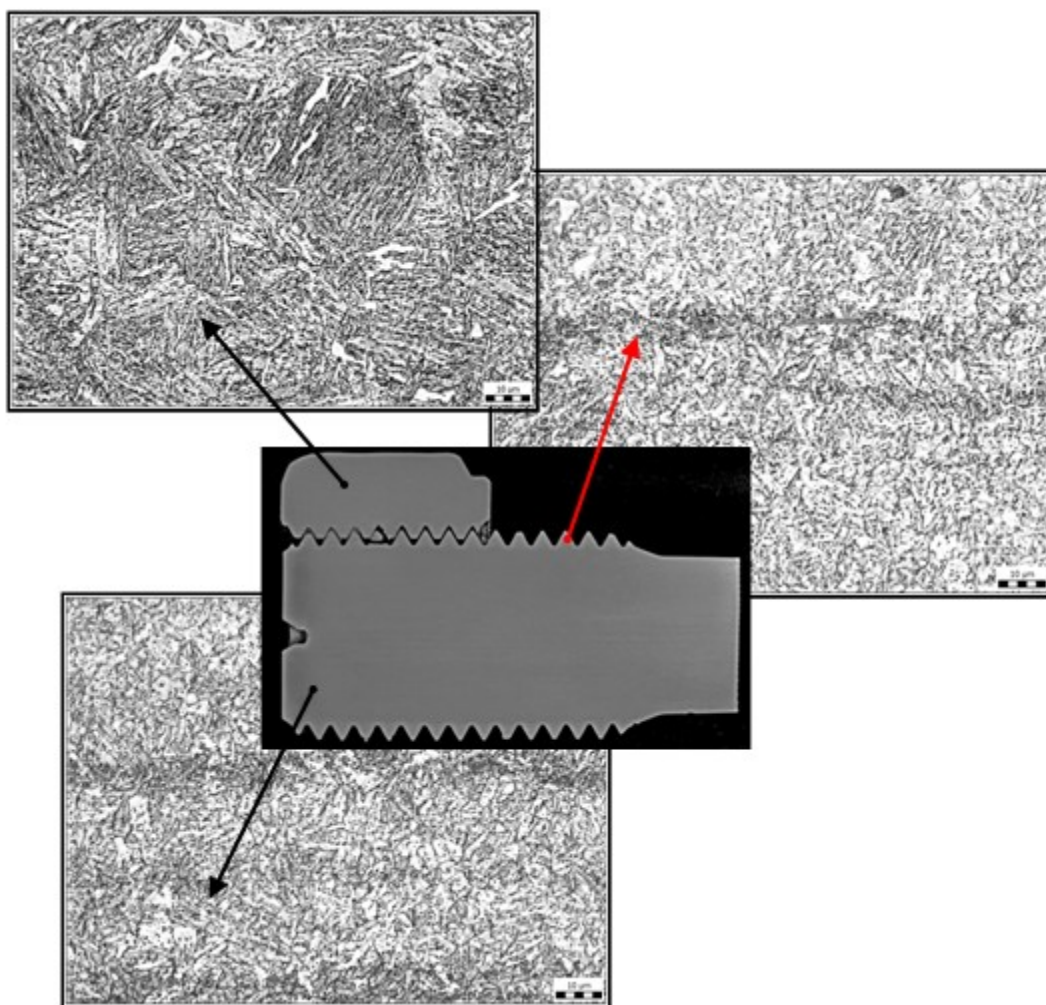


Obrázek č. 31 *Rovnoměrná řádková struktura vysoce popuštěných základních struktur*

Mikrostruktura matice vykazuje strukturu popuštěného martenzitu (obr. č. 32 vlevo). Je možné pozorovat ojedinělý výskyt feritu, jehož přítomnost může být způsobena nízkou teplotou kalení. Byl také zaznamenán výskyt primární vady struktury, kterou je oduhličení povrchu (obr. č 32 vpravo).



Obrázek č. 32 *Mikrostruktura matice (vlevo)
oduhličení na povrchu (vpravo)*



Obrázek č. 33 *Mikrostruktury matice, závitu a čela šroubu*

3.3 Hodnocení změny materiálových vlastností

V rámci hodnocení experimentální části jsou řešeny změny materiálových vlastností šroubů z úseku č. 15, které byly vystaveny tepelnému zatížení necelých 500 °C. Jsou porovnávány základní mechanické vlastnosti, které byly zjištěny pomocí zkoušky tahem s mechanickými vlastnostmi, které udává atest polotovarů příslušných šroubů. Následně byly metalografickým hodnocením porovnány výsledné a předpokládané materiálové mikrostruktury.

Při hodnocení mechanických vlastností jsou porovnávány veličiny, kterými jsou mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a zúžení. Pomocí zkoušky tahem bylo zjištěno, že hodnoty mechanických vlastností šroubů se od hodnot udávaných atestem výrazně neliší. Téměř totožné hodnoty vykazovalo příčné zúžení a také tažnost vzorků se lišila pouze o jednotky procent. Nevýrazným způsobem se od sebe lišily také hodnoty meze pevnosti. Největší

rozdílné hodnoty byl zaznamenán u hodnot meze kluzu, kdy vyšší hodnota udávaná atestem byla 624 MPa a výsledná hodnota u obou zkušebních vzorků byla 682 MPa. Porovnání výsledků z měření tvrdosti bohužel není možné, protože byly použity rozdílné metody měření. Avšak měřením mikrotvrdosti vzorků šroubů bylo zjištěno, že výsledné hodnoty, měřené v různých částech šroubu, se výrazně neliší. Mikrotvrdost HV0,1 se pohybovala v rozmezí od 246 po 272.

Metalografickým hodnocením mikrostrukturních změn taktéž nebyl zaznamenán velký rozdíl ve výsledné struktuře. Struktura oceli 21CrMoV5-7 se skládá z popuštěného bainitu, který může obsahovat části martenzitu, nebo feritu. Z metalografických výbrusů bylo zjištěno, že mikrostruktura šroubu je tvořena směsí vysoce popuštěných zákalných struktur.

Ze zjištěných poznatků je možné konstatovat, že nedošlo k výraznějšímu ovlivnění materiálu šroubů. I když byly šrouby vystaveny poměrně vysokým teplotám, nebyla zjištěna žádná zásadní změna mechanických vlastností. I když není zcela jasná mikrostruktura šroubů po tepelném ovlivnění, patrně nedošlo k výrazným změnám. Stejně jako před tepelným ovlivněním mikrostruktura obsahuje popuštěné zákalné struktury.

ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá změnou materiálových vlastností dvou kusů svorníkových šroubů. Svorníkové šrouby, které byly součástí přírubového spoje zařízení pro výrobu kyseliny dusičné, byly vystaveny značnému tepelnému působení. Následkem tohoto tepelného působení došlo k tomu, že dané šroubové spoje nebylo možné běžným způsobem demontovat. V úvodní části práce byla zpracována studie materiálů, které se používají v energetickém průmyslu. Materiály byly rozděleny do skupin podle jejich charakteristických vlastností a u každé skupiny byly uvedeny příklady konkrétních materiálů. V souvislosti s experimentální částí byly obecně popsány šroubové spoje a problematika jejich montáže. Taktéž byly definovány závity, jejich způsob výroby a vliv způsobu výroby na jejich vlastnosti. Úvodem experimentální části je seznámení s řešeným problémem a definice materiálu šroubů. Následně bylo provedeno zkoušení mechanických vlastností, konkrétně se jednalo o provedení zkoušky tahem a měření mikrosvrlosti. Metalografické zkoušení zahrnovalo hodnocení makrostruktury a mikrostruktury šroubů a také příslušných matic. Závěrem třetí kapitoly je hodnocení změny materiálových vlastností.

Dle dosažených výsledků experimentální části práce lze konstatovat, že nedošlo k žádným zásadním změnám mechanických vlastností, nebo změnám v mikrostruktuře šroubů. Původní hodnoty mechanických vlastností se od hodnot zjištěných experimentem liší minimálně. Je zřejmé, že stejně jako před tepelným ovlivněním je mikrostruktura tvořena základními popuštěnými strukturami. Z toho lze usoudit, že změna materiálových vlastností šroubů neměla zásadní vliv na znehodnocení šroubových spojů. Příčinou znehodnocení byla pravděpodobně souhra více vlivů. Nejzásadnějším vlivem je zřejmě vysoká teplota. Zejména nerovnoměrné tepelné namáhání po obvodu přírubového spoje mohlo být příčinou deformací přírub a následně deformací šroubových spojů. Taktéž tepelná degradace maziva mohla nepříznivě ovlivnit funkci šroubového spoje. S degradací maziva může být spojeno zadírání závitů, odštipování závitového profilu a zanesení závitu mezi šroubem a maticí nečistotami. K odštipování závitového profilu mohly také přispět defekty na vrcholech závitového profilu ve tvaru záložek, které souvisí se způsobem výroby závitového profilu, kterým bylo tváření. Na základě výše uvedených poznatků by bylo vhodné zvážit použití jiné technologie výroby závitů. Na správnou funkci šroubového spoje a poškození závitové části měla určitě také nepříznivý vliv opětovná montáž a demontáž šroubového spoje.

Seznam použité literatury

- [1] ANDĚROVÁ, Alena Anděrová. Energetické strojírenství v krizi. Hospodářské noviny IHNEED: online [online]. Copyright © 1996-2019 Economia, 2018 [cit. 2019-03-19]. ISSN 1213-7693. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-66243470-energeticke-strojirenstvi-v-krizi>
- [2] JANA, Martínková. Vliv delta feritu na mechanické vlastnosti ocelí a metody stanovení jeho obsahu [online]. Západočeská univerzita v Plzni, 2010 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: [https://www.old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Martinkova_Jana.pdf](https://www.old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2010/_sbornik/PapersPdf/Mgr/Martinkova_Jana.pdf)
- [3] FOLDYNA, Václav a Václav FOLDYNA. Žárupevnost a její vliv na životnost energetických zařízení: METAL 2008 [online]. Hradec nad Moravicí, 2008 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2008/sbornik/Lists/Papers/184.pdf>
- [4] FREMUNT, Přemysl a Tomáš PODRÁBSKÝ. Konstrukční oceli. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996. ISBN 80-85867-95-8.
- [5] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [6] NĚMEC, Karel. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli: Struktura a vlastnosti materiálů [prezentace]. In: . [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf
- [7] MACEK, Karel. Kovové materiály. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [8] ČÍHAL, Vladimír. Korozivzdorné oceli a slitiny. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická, č. spisu 471, roč. 104 (1999). ISBN 80-200-0671-0.
- [9] Korozivzdorné oceli jako konstrukční materiály. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/korozivzdorne-oceli-jako-konstrukcni-materialy-2-2-2.html>
- [10] SVV Praha, s.r.o. - Vzdělávání - Certifikace - Zkoušení - Ostatní služby - Home [online]. Copyright © [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <http://svv.cz/files/niklatitan.pdf>
- [11] MATOCHA, Karel. Design konstrukčních částí a jejich řízené stárnutí: Studijní opora [online]. In: . Ostrava, 2013 [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/636/636-Design_konstr_casti_riz_starnuti.pdf

- [12] HERNAS, Adam, Zdeněk JONŠTA, Miroslav TVRDÝ, Lubomír ČÍŽEK a Jaroslav PURMENSKÝ. Žárupevné oceli a slitiny. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2009. ISBN 978-80-248-2187-0.
- [13] ČADEK, Josef. Creep kovových materiálů. Praha: Academia, 1984. Fyzikálně metalurgická řada, sv. 11
- [14] Střední škola automobilní Kyjov, příspěvková organizace [online]. Copyright ©Q [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: http://www.sossoukyjov.cz/data/file/Strojnictvi/VY_32_INOVACE_5c/VY_32_INOVACE_5c10.pdf
- [15] Metodický portál - Detail materiálu Šroubové spoje – výklad. Metodický portál - POSPOLU - komunikační platforma [online]. Dostupné z: <https://pospolu.rvp.cz/detail-materialu?id=101> [16]
- [16] SPOJE ŠROUBOVÉ SŠ-COPT Kroměříž [online]. Copyright © [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=26888&revision=-1&instance=2>
- [17] Výroba závitů: Učební texty [online]. In: . [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/STT-Vyroba_zavitu_RAJ.pdf
- [18] Výroba závitů obráběním [online]. In: . SPŠ Třebešín Praha [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9976/mod_resource/content/0/V%C3%9DROBA%20Z%C3%81VIT%C5%AE%20OBR%C3%81B%C4%9AN%C3%8DM.pdf
- [19] VÝROBA ZÁVITŮ TVÁŘENÍM [online]. In: . SPŠ Třebešín Praha [cit. 2019-03-19]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/9977/mod_resource/content/0/VV%C3%9DROBA%20Z%C3%81VIT%C5%AE%20TV%C3%81%C5%98EN%C3%8DM.pdf
- [20] Šroubové spoje pro tlaková zařízení a možnosti jejich prediktivní údržby - 21/09/2016 - Řízení a údržba průmyslového podniku. [online]. Copyright © 2007 [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <http://udrzbapodniku.cz/hlavni-menu/artikuly/artikuly/article/sroubove-spoje-pro-tlakova-zarizeni-a-moznosti-jejich-prediktivni-udrzby/>
- [21] MINTPowerTools, s.r.o. - [online]. Dostupné z: http://www.mintpowertools.cz/source/Vzduchove-naradi/MINT_UPT_uvod_CZE.pdf
- [22] ZAČAL, J. Řešení problému šroubových spojů tlakové nádoby: diplomová práce. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2016 81 s. Vedoucí práce: Foltá, Z
- [23] Postup utažení | Šroubovací technika | Krouticí moment. Deprag [online]. Copyright © DEPRAG SCHULZ GMBH u. CO. [cit. 19.03.2019]. Dostupné z: <https://deprag.com/cs/sroubovací-technika/technické-informace/postup-utazeni/>

- [24] Kdo jsme, co děláme | Těsnění.cz. [online]. Copyright © P O K O R N Ý, spol. s r.o. [cit. 25.04.2019]. Dostupné z: <https://www.tesneni.cz/cs/kdo-jsme-co-delame>
- [25] Cr-Mo-V steel | SpringerLink. Home - Springer [online]. Copyright © 2018 SpringerNatureSwitzerland AG. Part of [cit. 25.04.2019]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F10837344_21

Poděkování

Tímto způsobem bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Lucie Krejčí, Ph.D. za rady poskytnuté k vypracování diplomové práce. Také chci poděkovat Ing. Zdeňku Štorkánovi za pomoc při metalografických zkouškách. V neposlední řadě velmi děkuji svým rodičům, za podporu při celém studiu.

Seznam příloh



Příloha 1 - Atest polotovaru šroubů

Příloha 2 - Protokol o zkoušení - tahová zkouška

Příloha 3 - Diagramy tahové zkoušky

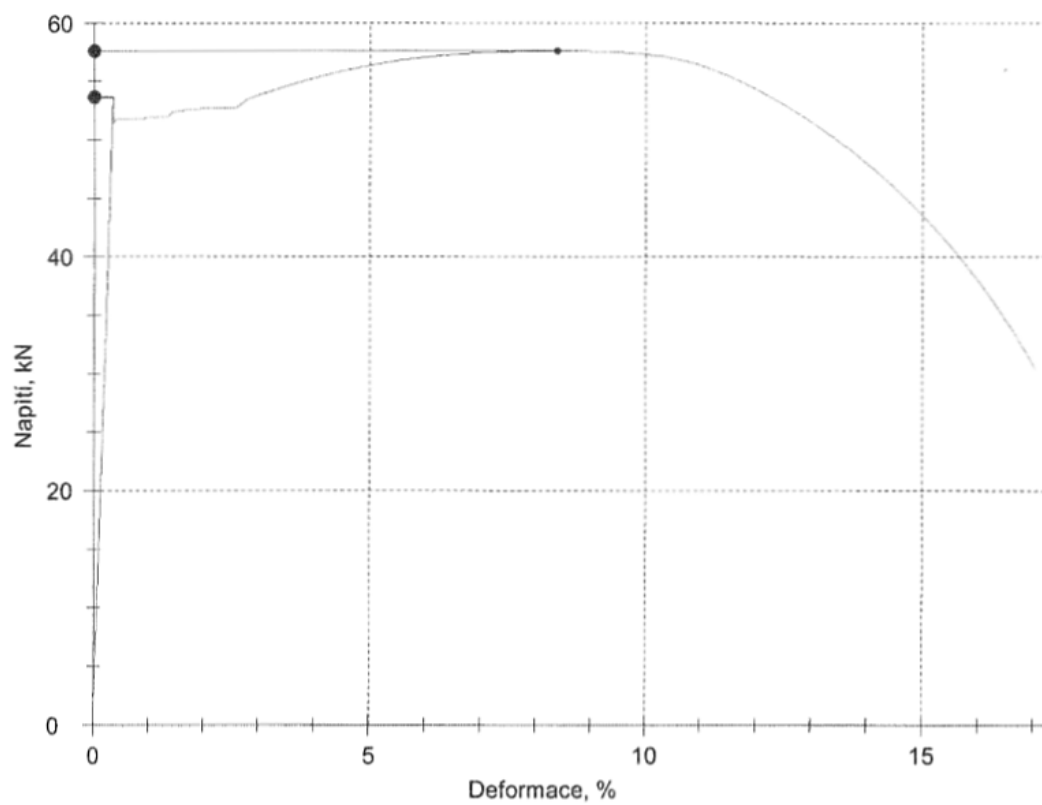
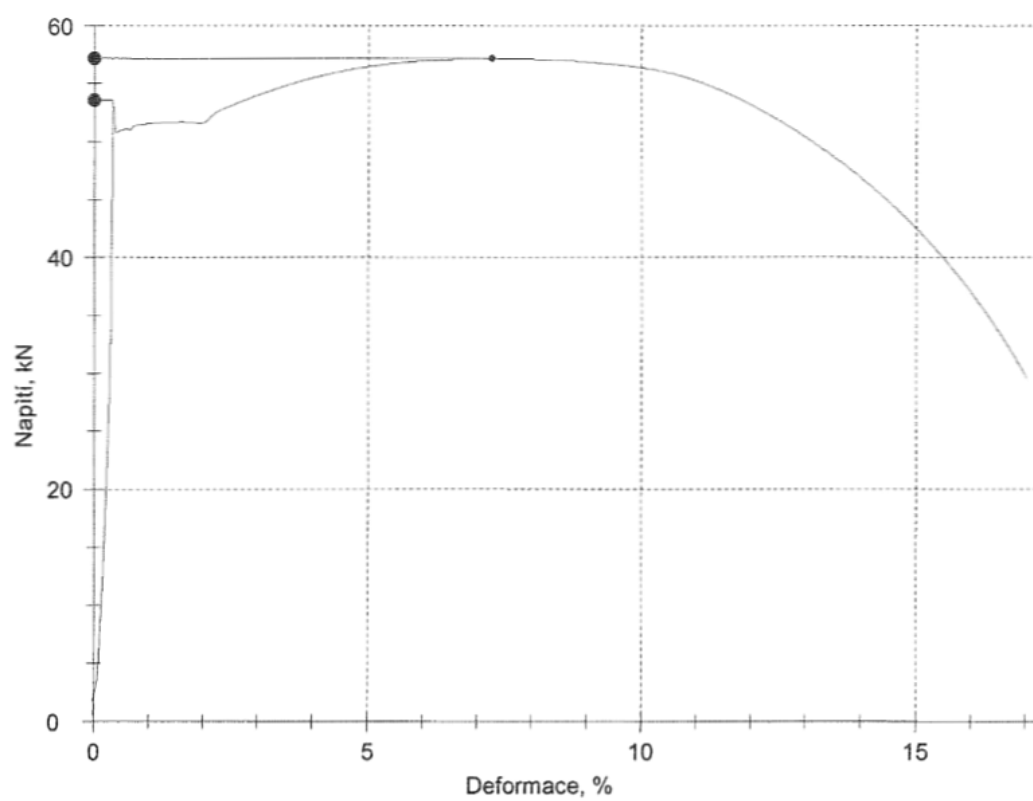
Příloha 4 - Rozdíl průběhu vláken tvářeného a obráběného závitu

Příloha 1 - Atest polotovaru šroubů

 SIDENOR		ABNAHMEPRÜFZEUGNIS								
Basauri Standort		ISO 9001 - ISO/TS 16949								
KUNDE:		PROZESSNUMMER: 1352724								
AUFTRAGSN°: 8.5413		AUFTRAGSN°: 196295-4		CHARGEN°: 43250						
ARTIKELNUMMER:		DARSTELLUNG: 81382		WALZDATUM: 20.06.2008						
PRODUKT IM AUFTRAG										
21CrMoV5.7 RUNDE STANGES ROHGEWALZT VERGUETET 80 -0,5/+0,5 mm 1/2 DIN 1013										
6.100 +0/+100 mm NORMALE										
EXPEDITIONS DATEN		ZUSTELLUNG: 80236908 GEWICHT (KG): 6.518		BÜNDEL: 3 BARREN: 27						
NORMEN UND VORSCHRIFTEN										
AD2000-W7 - 05.2002 ; DIN 17240 - .07.1976 ; EN 10269 - 01.08.1999										
DIN 01013 P1 - .11.1976 ; AD-MERKBLATT W0 - 01.10.2000										
WISTA 21CRM0V5-7QT - 01.07.2007 ; EN DIRECTIVA 97/23/CE: 97 - 29.05.1997										
EN 10204 : 2004 OCT. 2004 3.1										
CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG GUSS U: % CHARGEN°: 43250										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al
Min.	0,170	0,400	0,150			1,200		0,650	0,250	
Max.	0,250	0,800	0,350	0,020	0,020	1,500	0,600	0,800	0,350	0,030
Rep.	0,200	0,730	0,330	0,012	0,007	1,350	0,140	0,660	0,260	0,024
TECHNISCHE LIEFERBEDINGUNGEN										
Entnahme Probestück: 12,5 mm vom Rand ; Temperatur von: (1): Härten 900 °C ; Abkühlung: (1): Öl										
Temperatur von: (2): Anlassen 720 °C ; Zeit: (2): 6 Stunden										
TECHNISCHE LIEFERBEDINGUNGEN										
Richtung Probestück Zugprobe (laengst): laengst ; Proben n: 1 ; Rm (700/850 N/mm²): 741 N/mm²										
Re (Rp(0,2%) >= 590 N/mm²): Rp(0,2%) 624 N/mm² ; A ((5d) >= 16 %): (5d) 19,8 % ; Z (>= 60 %): 74 %										
Richtung Probestück Kerbschlagzähig (laengst): laengst ; Typ Probestück Kerbschlagzähigkeit (KV): KV										
Temperatur Kerbschlagzähigkeitsprobe (20 °C): 20 °C ; K(1) (>= 65 J): 187 J ; K(2): 183 J ; K(3): 190 J										
Härte (215/260 HBW): 228 HBW										
Richtung Probestück Zugprobe: laengst ; Proben n: 2 ; Rm: 734 N/mm² ; Re: Rp(0,2%) 615 N/mm²										
A: (5d) 20,2 % ; Z: 74,8 % ; Richtung Probestück Kerbschlagzähig: laengst										
Typ Probestück Kerbschlagzähigkeit: KV ; Temperatur Kerbschlagzähigkeitsprobe: 20 °C ; K(1): 189 J										
K(2): 184 J ; K(3): 193 J ; Härte: 225 HBW										
ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNGEN										
Standard Innere (1) (EN 10308-2001) ; Standard Innere fehler (2) (SIEMENS TLV918601-AGOST 2002)										
Art von inneren Fehlern (1) (Tabla 1, Tipo 1a, Clase 4)										
Art von inneren Fehlern (2) (Tabla 1, Tipo 1c, Clase 4) ; 100 % Ultraschallprüfung: ohne Befund										
100 % Kontrolle auf Oberflächenfehler: ohne Befund ; 100 % Verwechslungsprüfung: ohne Befund										

[illegible]

Příloha 3 - Diagramy tahové zkoušky



Příloha 4 - Rozdíl průběhu vláken obráběného a tvářeného závitu

